

# MASTER EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

Escuela Superior de Tecnología y Ciencias Experimentales



## EVALUACIÓN AMBIENTAL DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS DOMICILIARES DE JOÃO PESSOA (BRASIL). ESCENARIO ACTUAL Y ESCENARIOS ALTERNATIVOS DE MEJORA

TRABAJO FINAL DE MASTER

Estudiante: Marta Guinot Meneu

Tutora: Valeria Ibáñez Forés

Curso 2018 - 2019

Índice General

CAPÍTULO 1: MEMORIA..... 3

CAPÍTULO 2: ANEXOS..... 127

CAPÍTULO 3: PLANOS..... 143

CAPÍTULO 4: PRESUPUESTO..... 155

# CAPÍTULO 1:

## MEMORIA

## Índice de la Memoria

1.	INTRODUCCIÓN.....	9
2.	ANTECEDENTES .....	10
3.	OBJETO DEL PROYECTO .....	11
4.	MARCO TEÓRICO.....	12
4.1.	CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS SOLIDOS DOMICILIARES .....	12
4.2.	SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS .....	13
4.2.1.	PRE-RECOGIDA .....	14
4.2.2.	RECOGIDA Y TRANSPORTE .....	14
4.2.3.	PLANTAS DE TRIAJE .....	15
4.2.3.1.	Planta de selección.....	15
4.2.3.2.	Planta de recuperación de materiales .....	17
4.2.4.	VALORIZACIÓN .....	18
4.2.4.1.	PLANTA DE RECICLAJE .....	18
4.2.4.2.	TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS: EL COMPOSTAJE.....	19
4.2.4.3.	BIOMETANIZACIÓN .....	19
4.2.4.4.	TRATAMIENTO TÉRMICO.....	20
4.2.5.	DISPOSICIÓN FINAL .....	20
4.3.	MARCO NORMATIVO DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS EN BRASIL.....	22
4.3.1.	POLÍTICA NACIONAL DE RESIDUOS SÓLIDOS BRASILEÑA .....	22
4.3.2.	PLAN MUNICIPAL DE GESTIÓN DE RESIDUOS DE JOÃO PESSOA.....	23
4.3.2.1.	METAS DEL PLAN NACIONAL DE RESIDUOS SOLIDOS PARA 2031 y 2034 ...	25
4.4.	DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA .....	26
4.4.1.	ETAPA I: DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE .....	26
4.4.2.	ETAPA II: INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA .....	27
	Calidad de los datos del inventario .....	27
4.4.3.	ETAPA III: EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA.....	28
4.4.3.1.	Elementos obligatorios. Análisis por categoría de impacto.....	28
4.4.3.2.	Elementos opcionales: Descripción de los métodos de valoración del impacto	29
4.4.4.	ETAPA IV: INTERPRETACIÓN DEL CICLO DE VIDA .....	30
5.	METODOLOGÍA DE ESTUDIO .....	31
6.	BLOQUE I: ANÁLISIS DEL SGR BAJO ESTUDIO .....	34
6.1.	DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO .....	34

6.1.1.	DESCRIPCIÓN DE LA CIUDAD DE JOÃO PESSOA .....	34
6.1.2.	GENERACIÓN DE RSD EN JOÃO PESSOA.....	35
6.2.	SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS DE JOÃO PESSOA.....	36
6.1.1.	RECOGIDA Y TRANSPORTE INICIAL.....	36
6.1.1.1.	Recogida Selectiva y transporte a los núcleos .....	36
6.1.1.2.	Recogida Convencional y transporte a la PRM.....	38
6.1.2.	UNIDAD DE CLASIFICACIÓN DE LA RECOGIDA SELECTIVA – NÚCLEOS .....	39
6.1.3.	PLANTA DE RECUPERACIÓN DE MATERIALES (PRM) .....	39
6.1.4.	ALMACENAJE Y TRANSPORTES INTERMEDIOS .....	40
6.1.5.	VALORIZACIÓN .....	40
6.1.6.	DISPOSICIÓN FINAL. VERTEDERO .....	40
6.2.	CARACTERIZACIÓN DEL SGR EN JOÃO PESSOA .....	41
6.2.1.	RECOGIDA DE DATOS CUANTITATIVOS DEL SGR.....	41
6.2.2.	CALCULO DE FLUJOGRAMAS, TASAS DE RECOGIDA Y RECICLAJE .....	43
6.3.	EVALUACIÓN DEL SGR EN JOÃO PESSOA .....	47
6.3.1.	CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS.....	47
6.3.1.1.	GENERACIÓN DE RESIDUOS .....	47
6.3.1.2.	MATERIALES RECICLADOS Y DISPUESTOS EN VERTEDERO.....	48
6.3.1.3.	EVOLUCIÓN DE LA TASA DE RECICLAJE POR MATERIAL.....	49
6.4.	COMPARATIVA DEL COMPORTAMIENTO DEL SGR CON RESPECTO A LAS METAS NORMATIVAS .....	53
6.4.1.	METAS Y PLAZOS PARA LA REDUCCIÓN DE LOS RESIDUOS SECOS DISPUESTOS EN EL VERTEDERO.....	53
6.4.2.	METAS Y PLAZOS PARA LA REDUCCIÓN DE LOS RESIDUOS HÚMEDOS DISPUESTOS EN EL VERTEDERO .....	54
6.4.3.	CONCLUSIÓN: JUSTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD DE MEJORA .....	55
<b>7.</b>	<b>BLOQUE II: IDENTIFICACIÓN DE ASPECTOS DE MEJORA Y PROPUESTAS DE ESCENARIOS ALTERNATIVOS .....</b>	<b>56</b>
7.1.	IDENTIFICACIÓN DE LAS CAPITALES BRASILEÑAS CON MEJORES ÍNDICES DE RECUPERACIÓN DE RESIDUOS RECICLABLES.....	57
7.2.	DESCRIPCIÓN DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS EN BRASILIA, GOIÂNIA, FLORIANÓPOLIS y PORTO ALEGRE.....	59
7.2.1.	SGR DE GOIÂNIA.....	59
7.2.2.	SGR DE BRASILIA.....	62
	Tratamiento de la recogida selectiva .....	63
7.2.3.	SGR DE FLORIANÓPOLIS .....	67
7.2.4.	SGR DE PORTO ALEGRE .....	71

7.3.	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTA DE MEJORAS.....	75
7.3.1.	MEJORA I: OPTIMIZACIÓN DE LA RECOGIDA SELECTIVA .....	77
7.3.2.	MEJORA II: OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA DE RECUPERACIÓN DE MATERIALES.....	80
7.3.3.	MEJORA III: COMPOSTAJE DE LA MATERIA ORGÁNICA .....	82
7.4.	CONFIGURACIÓN DE ESCENARIOS ALTERNATIVOS.....	85
<b>8.</b>	<b>BLOQUE III: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ACV AL CASO DE ESTUDIO.....</b>	<b>89</b>
8.1.	ETAPA I: DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE .....	89
8.1.1.	DEFINICIÓN DE OBJETIVOS.....	89
8.1.2.	DEFINICIÓN DEL ALCANCE.....	89
8.1.3.	DEFINICIÓN DE LA UNIDAD FUNCIONAL .....	90
8.2.	ETAPA II: INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA .....	91
8.2.1.	DATOS DE INVENTARIO .....	92
8.2.1.1.	ETAPA 1: RECOGIDA Y TRANSPORTE INICIAL .....	92
8.2.1.2.	ETAPA 2: UNIDAD DE CLASIFICACIÓN DE LA RECOGIDA SELECTIVA – NÚCLEOS	93
8.2.1.3.	ETAPA 3: PLANTA DE RECUPERACIÓN DE MATERIALES (PRM) DE LA RECOGIDA CONVENCIONAL .....	94
8.2.1.4.	ETAPA 4: TRANSPORTES INTERMEDIOS .....	95
8.2.1.5.	ETAPA 5: Valorización.....	96
8.2.1.6.	ETAPA 6: Disposición Final. Vertedero .....	99
8.2.2.	MODELO DE INVENTARIO .....	100
8.2.3.	ESTUDIO DE LA REPRESENTATIVIDAD Y CALIDAD DE LOS DATOS.....	101
8.2.3.1.	Representatividad de los datos a nivel nacional .....	101
8.2.3.2.	Calidad de los datos.....	101
8.3.	ETAPA III: EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA (EICV) .....	103
8.3.1.	ANÁLISIS DEL IMPACTO ASOCIADO A LAS ETAPAS DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS .....	103
8.3.2.	ANÁLISIS DEL IMPACTO ASOCIADO AL FLUJO DE MATERIALES RECOGIDOS MEDIANTE RECOGIDA SELECTIVA VS RECOGIDA CONVENCIONAL.....	107
8.3.3.	ANÁLISIS COMPARATIVO DEL IMPACTO DE LOS ESCENARIOS PROPUESTOS...	109
8.3.4.	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	112
8.4.	ETAPA IV: INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS .....	114
<b>9.</b>	<b>BLOQUE IV: ANÁLISIS DEL ESCENARIO ÓPTIMO .....</b>	<b>115</b>
9.1.	ANÁLISIS DEL CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVA .....	115
9.1.1.	METAS Y PLAZOS PARA LA REDUCCIÓN DE LA DISPOSICIÓN DE LOS RSD SECOS EN EL VERTEDERO .....	115

9.1.2.	METAS Y PLAZOS PARA LA REDUCCIÓN DE LA DISPOSICIÓN DE LOS RSD HÚMEDOS EN EL VERTEDERO .....	116
9.2.	ANÁLISIS DE LA ECO-EFICIENCIA .....	117
9.2.1.	ANÁLISIS AMBIENTAL .....	117
9.2.2.	ANÁLISIS ECONÓMICO .....	117
9.2.2.1.	Precios unitarios .....	117
9.2.2.2.	Costes operacionales por etapas del sistema de gestión .....	118
9.2.2.3.	COSTE OPERACIONAL EN FUNCIÓN DE LAS TONELADAS GESTIONADAS..	120
9.2.3.	DIAGRAMA DE ECO-EFICIENCIA .....	121
<b>10.</b>	<b>CONCLUSIÓN FINAL.....</b>	<b>122</b>
<b>11.</b>	<b>NORMAS Y REFERENCIAS.....</b>	<b>123</b>
11.1.	LEGISLACIÓN APLICABLE .....	123
11.2.	BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN .....	123
11.3.	BIBLIOGRAFÍA WEB .....	126
11.4.	PROGRAMAS UTILIZADOS .....	126

# 1. INTRODUCCIÓN

La creciente producción y acumulación de Residuos Sólidos Domiciliares (RSD) representa un problema para la salud pública, ya que puede provocar la contaminación del agua, el suelo y la aparición de vectores transmisores de enfermedades (Ghesla, P et al., 2018). Consecuentemente, la gestión adecuada de los RSD es un servicio muy importante para la sostenibilidad ambiental en todo el mundo. Sin embargo, la implantación de Sistemas de Gestión de Residuos (SGR) adecuados sigue siendo uno de los principales desafíos pendientes en los países poco desarrollados (Ibañez-Forés, 2018).

En Brasil, la generación de RSD ha aumentado en las últimas décadas debido principalmente al rápido crecimiento económico del país, que ha llevado a poblaciones urbanas más grandes y cambios en el estilo de vida de su población (Ibañez-Forés et al., 2018). Esta situación ha fomentado la adopción del actual marco regulatorio legal, que fue propuesto por la Política Nacional sobre Residuos Sólidos - PNRS (Lei 12305, 2010), ya que se necesitan acciones para reducir efectivamente la cantidad de residuos potencialmente reciclables que se disponen en vertederos sanitarios, además de maximizar el aprovechamiento de subproductos como el compostaje.

Aunque el sistema de gestión de residuos sólidos en Brasil ha mejorado significativamente desde que entró en vigor la PNRS, aún queda mucho por hacer. Solo un poco más de la mitad de los RSD recogidos se depositan en vertederos sanitarios (58.3%) y solo el 64.8% de los municipios brasileños tienen iniciativas para la recogida selectiva de materiales reciclables (Ibañez-Forés et al., 2018).

Por lo tanto, desde el Gobierno Federal se insta a los municipios a desarrollar planes integrados para la gestión de los residuos, basados principalmente en estrategias que buscan promover el diseño y uso de vertederos sanitarios y mejorar la recogida selectiva actual. Además de la integración del sector del reciclaje informal en el sistema formal.

João Pessoa fue una de las primeras capitales brasileñas en implantar progresivamente un programa de recuperación de materiales reciclables mediante la combinación de programas de recogida selectiva puerta a puerta y de una Planta de Recuperación de Materiales (PRM), donde los materiales reciclables se separan manualmente del flujo de residuos mixtos. A pesar de dichos esfuerzos realizados, tal y como afirman Ibañez-Forés et al. (2018) en su estudio, aún hay espacio para mejoras adicionales, la tendencia es positiva aunque lenta, y el porcentaje de residuos que finalmente se eliminan en los vertederos sigue siendo muy alto (más del 98% en 2015).

Esta investigación se centra en proponer y evaluar ambientalmente diferentes alternativas de mejora propuestas para el SGR en João Pessoa (Brasil) que permitan alcanzar los objetivos marcados por la legislación a corto, medio y largo plazo. Para ello, previamente se requiere analizar exhaustivamente cómo ha evolucionado la caracterización del SGR en el municipio desde 2016 hasta 2018 y comparar dicha evolución con la del resto de capitales brasileñas.



## 2. ANTECEDENTES

El aumento de la población y sus hábitos de consumo son uno de los principales problemas actuales para el medio ambiente, ya que implican un incremento considerable de la generación de residuos. Tales aspectos han puesto de manifiesto la necesidad imperiosa de mejorar los Sistemas de Gestión de los RSD con el objetivo de optimizar su valorización.

Con el fin de reducir la cantidad de residuos sólidos que se destinan a los vertederos, muchas ciudades brasileñas han incorporado a sus sistemas de gestión la recogida selectiva. Este proceso consiste en la separación y recogida de materiales reciclables, separados en origen según su categoría (papeles, plásticos, metales, vidrios, etc.) con el fin de venderlos a industrias que los reutilizan o reciclan como materia prima secundaria.

Esta práctica se ha vuelto importante en Brasil por estar relacionada con la generación de economía de materia prima secundaria, generación de trabajo y rentas y preservación del medio ambiente y de la salud pública. João Pessoa fue una de las primeras ciudades brasileñas en implantar el programa de recogida selectiva de basura puerta a puerta para la gestión de residuos sólidos domiciliarios.

El origen de este Trabajo Fin de Máster (TFM) surge de la realización de unas prácticas extracurriculares en el Grupo de Investigación INGRES, asociado al Área de Proyectos de Ingeniería del Departamento de Ingeniería Mecánica y Construcción.

En el año 2016, el Grupo INGRES realizó un estudio preliminar de evaluación del impacto ambiental de la gestión de residuos sólidos en el municipio de João Pessoa, en Paraíba (Brasil) entre los años 2005 y 2015. Dicho estudio se centró en analizar la evolución del sistema de gestión, en general, y los efectos de la recogida selectiva, en particular, entre los años 2005 y 2015. Ahora bien, no fue hasta el mismo año 2015, cuando se publicó el Plan Municipal de Gestión Integral de Residuos (PMGIRS) de João Pessoa, que establece los objetivos de recuperación de residuos para 2031 y 2034 y modifica el marco normativo aplicable.

El presente TFM pretende conocer la situación actual del sistema de gestión de residuos municipales de este municipio, con el fin de analizar las ratios actuales de recuperación de residuos y proponer mejoras que permitan alcanzar los objetivos marcados por la legislación a corto, medio y largo plazo. Estos escenarios de mejora alternativos serán analizados comparativamente desde el punto de vista ambiental, mediante la aplicación de la metodología de Análisis del Ciclo de Vida (ACV).

### 3. OBJETO DEL PROYECTO

El objetivo de este Trabajo Final de Master es proponer diferentes acciones de mejora en la gestión de RSD del municipio de João Pessoa, con la finalidad de cumplir con los objetivos ambientales impuestos por la legislación brasileña en materia de recuperación de residuos para el año 2031 y el 2034, y realizar la evaluación ambiental de las alternativas propuestas para identificar la que mejor comportamiento ambiental presenta.

Para alcanzar dicho objetivo es necesario analizar el sistema actual de gestión de residuos (escenario BASE) y estimar su tendencia a partir del año 2018, con finalidad de identificar las etapas del ciclo de vida de este sistema de gestión con mayor impacto ambiental, así como calcular los ratios anuales de recuperación de residuos y compararlos con las metas propuestas por la legislación. Una vez caracterizado el SGR actual se propondrán las posibles mejoras que serán evaluadas comparativamente desde el punto de vista ambiental.

Para la identificación de aspectos de mejora y propuesta de escenarios alternativos al actual, se realizará un estudio comparativo de los SGR implementados en todas aquellas capitales de provincia de Brasil, donde las ratios de recuperación de residuos sean superiores a las de João Pessoa. A partir de la información obtenida, se generará una propuesta de medidas a incorporar en el SGR, que se implementarán como escenarios de mejora (escenarios alternativos), con el fin de conseguir que los ratios de recuperación de residuos propuestos por la legislación puedan alcanzarse en plazo.

Para finalizar, se realizará la evaluación ambiental tanto del escenario actual como de los escenarios alternativos propuestos, mediante la aplicación de la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) a través del modelado de escenarios con un software de ACV (SimaPro 2018). Como resultado se obtendrán indicadores que cuantifiquen la variación en el impacto ambiental producido en cada escenario.

El ACV es un instrumento de evaluación que permitirá cuantificar los impactos ambientales y así entender cuáles son las etapas del SGR y las mejoras aplicables más sostenibles.

Con la información obtenida en estas tres etapas, será posible priorizar las acciones de mejora encaminadas al cumplimiento de la legislación en materia de gestión de residuos. Dichas acciones de mejora no sólo serán analizadas desde el punto de vista ambiental, sino que también se validarán desde el punto de vista normativo y económico.

## 4. MARCO TEÓRICO

En el siguiente punto se realiza una revisión bibliográfica acerca de la composición de los Residuos Sólidos Domiciliares (RSD), el sistema de gestión de residuos, la normativa brasileña en cuanto a la gestión de residuos en general y, más concretamente, en la ciudad bajo estudio (João Pessoa) y por último se describen los fundamentos de la metodología de Análisis del Ciclo de Vida aplicable al Sistema de Gestión de Residuos.

### 4.1. CLASIFICACIÓN DE LOS RESIDUOS SOLIDOS DOMICILIARES

Los Residuos Sólidos Domiciliares (RSD) son los producidos en los hogares como consecuencia de las actividades domésticas. La composición de estos residuos se explica a continuación.

#### **Residuos Sólidos Domiciliares Secos (RSD-secos)**

Los RSD-secos son parte de los residuos domiciliarios y están principalmente constituidos por embalajes de productos en general, fabricados a partir de plásticos, papel, vidrio y diferentes metales, entre otros materiales.

#### **Residuos Sólidos Domiciliares Húmedos (RSD-Húmedos)**

Los residuos húmedos también forman parte de los residuos domiciliarios, son entendidos como los residuos orgánicos producidos en los domicilios, restaurantes y empresas que por su propia naturaleza, tienen origen animal o vegetal. Alguno de estos ejemplos son los restos de alimentos (carnes, vegetales, frutas, cascaras de huevo, etc.), madera, huesos o las semillas.

#### **Residuos Sólidos Domiciliares Restos**

Entre los residuos sólidos domiciliarios están las partes contaminadas: los embalajes que no se preservan secos, los residuos húmedos que no pueden ser procesados en el conjunto de los demás, los restos de las actividades de higiene u otros tipos de residuos. Todos estos residuos sólidos, en su mayoría son susceptibles de reaprovecharse o transformarse con un correcto reciclado.

## 4.2. SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS

Los Residuos Sólidos Urbanos derivados de las actividades productivas y de consumo, siguen constituyendo actualmente uno de los problemas ambientales más serios, debido principalmente a que la cantidad que se genera sigue aumentando año tras año.

En 2016 las ciudades del mundo generaron 2010 millones de toneladas de residuos sólidos, se espera que la generación anual de residuos aumente en un 70% desde los niveles de 2016 a 3,40 mil millones de toneladas en 2050. Consecuentemente, puede afirmarse que el ritmo de generación de los residuos sólidos aumenta a un ritmo que supera la capacidad del medio ambiente para asimilarlo y de las autoridades municipales para manejarlo o gestionarlo (Azevedo, 2019).

En todo el mundo, las tasas de generación de residuos están aumentando. En 2016, las ciudades del mundo generaron 2.010 millones de toneladas de desechos sólidos, lo que representa una huella de 0,74 kilogramos por persona por día. Con el rápido crecimiento de la población y la urbanización, se espera que la generación anual de residuos aumente en un 70% desde los niveles de 2016 a 3,40 mil millones de toneladas en 2050.

Como resultado de la creciente cantidad de residuos generados los Sistemas de Gestión de Residuos se han convertido en un verdadero reto para los Gobiernos de todos los países del mundo (Márquez, 2011) además de en un tema prioritario en la problemática ambiental.

Para poder tener una buena gestión de los RSD es necesario cuantificar la generación de residuos del área a gestionar, conocer su calidad y composición, la cual varía dependiendo del estado socioeconómico, la densidad poblacional, el nivel de urbanización y otros elementos como los periodos estacionales y las actividades que se realizan.

La gestión de residuos sólidos engloba todas las actividades necesarias para lograr metas y objetivos específicos de gestión y valorización de la totalidad de los residuos generados en una determinada zona geográfica. Comienza con la recogida de los mismos, su transporte hasta las instalaciones donde este se prepara o almacena y su tratamiento intermedio para optimizar la valorización del residuo o su eliminación.

En global, estas actividades pueden agruparse en cuatro etapas relacionadas, tal y como indica la Figura 1.

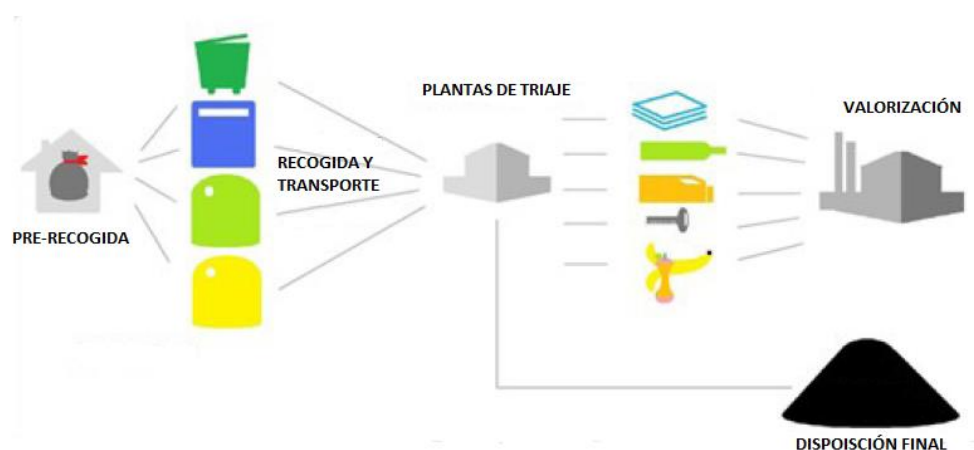


Figura 1. Etapas genéricas de un Sistema de Gestión de Residuos. Fuente: Propia

### 4.2.1. PRE-RECOGIDA

La pre-recogida comprende las actividades de manipulación, procesado y almacenamiento de los RSD desde su origen hasta que son depositados en los puntos de recogida.

Esta etapa tiene un efecto destacado en la calidad y composición de los residuos, la cual varía dependiendo del estado socioeconómico, la densidad poblacional, el nivel de urbanización y otros elementos como los periodos estacionales y las actividades que se realizan.

### 4.2.2. RECOGIDA Y TRANSPORTE

Una vez los ciudadanos han depositado los residuos en el punto de recogida (pre-recogida), entra en función la etapa de recogida y transporte de los residuos. Dependiendo de cómo se depositan, esta etapa puede clasificarse en cuatro modalidades:

- **Recogida puerta a puerta:** El servicio de limpieza va puerta a puerta de los habitantes de la ciudad recogiendo los residuos. Los residuos pueden presentarse en bolsas, en cubos o en pequeños contenedores de ruedas enfrente de sus lugares de residencia, o bien puede que el mismo edificio tengan un local específico donde se sitúan estos depósitos.
- **Recogida por contenedor:** En este caso, la recogida se hace en grandes contenedores. El vaciado de los contenedores puede ser mecánico, los operarios solo tienen que acercar el contenedor al camión y engancharlo al sistema de descarga; o automático, el conductor se encarga de toda la operación desde la cabina del camión. La recogida es mucho más rápida y los costes se reducen considerablemente.
- **Recogida en áreas de aportación:** La recogida se hace en grandes contenedores y son los ciudadanos los que se desplazan a estas áreas a depositar sus residuos.
- **Recogida por llamada previa:** En este caso, el equipo de recogida va al lugar de generación a recoger el residuo, previa llamada del ciudadano o la empresa. Se utiliza para residuos de baja e imprevisible frecuencia de recogida, como los voluminosos (muebles y enseres viejos).

Por otra parte, en función del grado de fraccionamiento de los residuos depositados se distinguen dos tipos de recogida:

- **Recogida convencional.** Los residuos se depositan todos juntos en los contenedores, cubos o en las bolsas. No existe ningún tipo de separación por tipología.
- **Recogida selectiva.** En este caso, los ciudadanos depositan los residuos de forma separada según su tipología (papel, plástico, vidrio, metal, materia orgánica). En la recogida selectiva es fundamental la colaboración ciudadana y que estos tengan educación ambiental, para que los vecinos sepan separar los residuos aprovechables del resto de residuos y los coloquen en los contenedores, cubos o en las bolsas de forma adecuada.

Para la recogida de los residuos hay que diseñar una ruta adecuada y calcular un conjunto de instalaciones y equipos. Un aspecto tener en cuenta, es que cuanto menor sea la distancia recorrida por los ciudadanos, mayor será la distancia recorrida por los agentes catadores.

Una vez recogidos los residuos de la ciudad, estos son transportados a la planta de tratamiento correspondiente o a su disposición final. Cuando hay grandes distancias desde los puntos de recogida de los residuos hasta su próximo destino (planta de tratamiento o vertedero) se recomienda utilizar estaciones de transferencia.

La estación de transferencia o transbordo es una instalación intermedia en la cual se descargan y almacenan los residuos para después posteriormente transportarlos al destino siguiente. Normalmente se transfieren a camiones con carga superior. Esta operación es necesaria cuando la distancia a la siguiente instalación se incrementa tanto que el transporte directo ya no es rentable económicamente, de esta forma se aumenta la operatividad y el rendimiento.

### 4.2.3. PLANTAS DE TRIAJE

La etapa de triaje es una parte importante en el ciclo de vida de los RSD, ya que es en esta etapa donde se separan las fracciones reciclables del flujo de residuos, eliminando los impropios y asegurando que los materiales que se separan cumplen con los requisitos de calidad exigidos para su posterior reciclaje. En el proceso de gestión de los RSD se pueden diferenciar dos tipos de plantas de recuperación:

- Planta de selección.
- Planta de Recuperación de Materiales (PRM).

A continuación, se describe el funcionamiento de cada planta:

#### 4.2.3.1. *Planta de selección*

En las plantas de selección se dirigen los residuos recogidos de forma selectiva. La finalidad de estas plantas es descartar las mezclas y garantizar que los materiales separados se encuentran con la calidad requerida en las plantas recicladoras.

Existen diferentes tipos de plantas de selección:

- Plantas clasificadoras de envases
- Plantas clasificadas de papel y cartón
- Plantas clasificadoras de vidrio
- Plantas de clasificación de materiales reciclables

#### **Plantas clasificadoras de envases**

Si el sistema de gestión de RSD incluye la recogida selectiva de la fracción de envases, en un mismo contenedor se recogen envases metálicos, plásticos y tetra briks. Así pues, una planta de separación de envases tiene como objetivo principal la segregación de las fracciones: polietileno de alta densidad (PEAD), polietileno de baja densidad/film (PEBD), tereftalato de polietileno (PET), poliestireno (PS), polipropileno (PP), férrico, no férrico y tetra brik (Márquez, 2011).

La primera fase de esta planta es la descarga de los envases en un área de recepción. Los residuos son colocados en las cintas transportadoras donde los operarios realizan el primer triaje separando los elementos voluminosos, si los hubiera.

El flujo de residuos es dirigido hasta un abridor de bolsas a través de una cinta transportadora. A continuación, se introduce en una mesa densimétrica que clasifica los envases por su densidad:

- Materiales finos, compuesta por pequeñas partículas con un tamaño conducidas directamente a rechazo.
- Fracción ligera, compuesta principalmente por residuos de plástico film y papel-cartón. Esta línea cuenta un gran aspirador separa las bolsas de plástico y el film.
- Fracción pesada, compuesta mayoritariamente por botellas, envases de tetra brik, latas y otros objetos similares. Con un gran imán se separan los envases de acero. El resto de envases: PET, PEAD, Brik y otros envases de plástico se separan a través de un sistema de separadores ópticos.

Para finalizar, se realiza un control de calidad en todos los envases anteriormente seleccionados, cada uno de ellos se deposita en una cinta transportadora y los operarios comprueba que el material que circula a través de ella cumple con los requisitos de reciclabilidad exigidos en cada una de las plantas de reciclaje.

Una vez todos los envases separados se dirigen a las prensas donde se compactan para transportarlos a las plantas recicladoras y así darles una segunda vida.

### **Plantas clasificadoras de papel y cartón**

A las plantas de clasificación de papel y cartón llega el contenido de los contenedores de recogida selectiva de papel y cartón. Su función es eliminar los impropios mediante la selección manual.

El papel y cartón recogido se deposita en el área de descarga, donde una pala mecánica alimenta una cinta transportadora donde mediante la separación manual, se eliminan los impropios y se distingue el papel del cartón introduciendo cada material en un depósito.

Finalmente, cada una de las fracciones separadas se tritura, se compacta y se embala para enviarla a la fábrica de reciclaje.

### **Plantas clasificadoras de vidrio**

El proceso desarrollado en las plantas clasificadoras de vidrio tiene como objetivo la obtención de calcín, compuesto de pequeños fragmentos de vidrio, homogeneizado en granulometría y color. A estas plantas llega el contenido de los contenedores de la recogida selectiva de vidrio (Márquez, 2011).

El vidrio procedente de la recogida selectiva se descarga a una tolva para regular el flujo de entrada de material al proceso de clasificación. El primer tratamiento al que se someten los residuos es el cribado mediante el uso de cribas vibratorias de varillas o mesas densimétricas. Aquí el material se clasifica en tres fracciones según el tamaño de partícula:

- Las partículas menores de 10 mm ya se consideran el producto final que se desea obtener (el calcín).
- Las partículas que se encuentran entre 10 mm y 45 mm, se somete a separadores electromagnéticos y corrientes de Foucault, para extraer todos los restos metálicos. A

continuación, el material resultante pasa por un conjunto de separadores ópticos combinados con aspiradores, que eliminan los pequeños papeles y el polvo contenidos en los fragmentos de vidrio (calcín).

- Las partículas mayores de 45 mm se someten a un triaje manual en el que se eliminan, principalmente, restos cerámicos. La fracción resultante se tritura, mediante un molino, y se somete a un campo magnético para extraer los materiales férricos contenidos. La fracción resultante se recircula hasta la criba vibratoria inicial.

El calcín obtenido se almacena hasta su transporte a centros de reciclado, donde se utiliza como materia prima sustituta de la arena en la producción de nuevos productos vítreos.

### **Plantas clasificadoras de materiales reciclables**

Además, en los países en desarrollo, como Brasil, hay una tipología de plantas denominadas Plantas Clasificadoras de Materiales Reciclables o Plantas de Selección de Materiales Reciclables.

Estas plantas son muy precarias, puesto que cuentan con una nave donde se reciben los materiales procedentes de la recogida selectiva y los operarios de la planta separan de forma manual los materiales reciclables, separándolos según su naturaleza y depositándolos en bolsas o contenedores.

Una vez separados se prensan y se empaican para su transporte a la planta de reciclaje. Esta tipología de plantas no tiene ninguna tecnología más que una prensa.

#### **4.2.3.2. *Planta de recuperación de materiales***

La finalidad de las plantas de recuperación de materiales es separar las diferentes fracciones de los residuos mezclados, recogidos de forma convencional, para su posterior valorización. En estas plantas, por una parte se recuperan los materiales susceptibles de reciclaje, para otorgarles una segunda vida útil en las plantas recicladoras, y, por otro lado, se separa la materia orgánica para valorizarla, por ejemplo, mediante el compostaje, en las plantas de tratamiento biológico.

En estas plantas, la gestión de los RSD comienza con su recepción en el área de pesaje y control. Aquí se controlan los materiales que entran, registrando su origen y cantidad, además de verificar su naturaleza.

Estos residuos son almacenados en naves o fosos, donde se inicia una primera separación de los objetos voluminosos. El “pulpo” mecánico traslada los residuos libres de voluminosos sobre la cinta transportadora. En esta cinta se realiza una clasificación manual, con el fin de eliminar del flujo cartones y otros objetos voluminosos que el pulpo no ha descartado. Los productos recuperados son depositados en los correspondientes contenedores a través de unas tolvas.

El flujo de residuo entra en el Trommel-abrebolsas, donde se separa en dos fracciones: fracción fina, formada principalmente por materia orgánica, y fracción gruesa, formada principalmente por residuos de envases.

Cada una de estas fracciones sigue una línea de proceso independiente, formada por las siguientes operaciones:



- Triage manual, donde se separan papel/cartón, plástico y vidrio.
- Separadores electromagnéticos, donde se extraen los metales férricos.
- Corrientes inductivas de Foucault, donde se produce la separación del aluminio, latón, cobre, etcétera.

Cada una de las fracciones recuperadas en estas operaciones se compacta y embala para su posterior traslado a las plantas recicladoras.

El flujo de residuo resultante de la línea de la fracción gruesa se considera rechazo y, por tanto, se destina a vertedero. El flujo resultante de la línea de la fracción fina está compuesto mayoritariamente de materia orgánica, por lo que se destina a una planta de tratamiento biológico.

#### **4.2.4. VALORIZACIÓN**

Una vez separados todos los residuos, cada fracción se dirige a su correspondiente proceso de valorización el cual se encargará de transformarlos en nueva materia prima para darle un segundo uso o con la que fabricar cualquier producto en el que se utilice el material o bien se utilizará para formar energía.

Los principales métodos de valorización son: el reciclaje, los tratamientos biológicos (compostaje), biometanización y los tratamientos térmicos.

##### **4.2.4.1. PLANTA DE RECICLAJE**

El reciclaje es la transformación de los residuos de papel, cartón, metal, vidrio y algunos plásticos en materias primas, para que la industria los pueda utilizar de nuevo en la fabricación de nuevos productos.

El reciclaje proporciona beneficios tanto ambientales como económicos. Los beneficios ambientales derivan de que se evita la producción de nueva materia prima procedente de recursos naturales y, además, se reducen los residuos que acaban finalmente en el vertedero. La descomposición de los residuos en los vertederos genera líquidos y gases con efectos nocivos para el suelo, el aire y el agua, por lo que con el reciclaje se estarán evitando estos impactos.

En cuanto a los beneficios económicos, la etapa de valorización es la única fase en todo el sistema de gestión que los aporta. Estos beneficios provienen de la venta de los materiales recuperados a las plantas de reciclaje. También del coste que se evita de tener que gestionar los residuos para su deposición o eliminación.

Los beneficios económicos de los sistemas de gestión de residuos dependen de los tipos de ganancia del recurso y estas están afectadas por los precios de venta de los productos en el mercado (Zaman, 2016), por lo tanto el rendimiento general de reciclaje puede que varíe debido a las condiciones del mercado.

#### **4.2.4.2. TRATAMIENTOS BIOLÓGICOS: EL COMPOSTAJE.**

El compostaje se puede definir como el proceso de degradación biológica de la materia orgánica que se inicia por la descomposición y estabilización de los sustratos orgánicos en condiciones controladas y aeróbicas (Kucbel, M. et al., 2019).

Los procesos biológicos utilizan microorganismos naturalmente existentes para descomponer la fracción biodegradable de los residuos, transformándola en residuos estabilizados con propiedades y características completamente diferentes del material que les dio origen. Los microorganismos aerobios requieren oxígeno molecular como aceptor externo de electrones en el metabolismo de la respiración, lo que resulta en una rápida tasa de crecimiento bacteriano y alta producción de masa celular (Reichert et al., 2014).

La estabilización de los desechos orgánicos mediante el compostaje es altamente deseable ya que este elimina el olor desagradable, es fácil de manipular, aumenta el contenido de nutrientes y evita que los desechos orgánicos se vuelvan fitotóxicos cuando se incorporan al suelo (Zulkepli, N. E. et al., 2017).

Los principales beneficios del compostaje son la reducción de la cantidad de residuos depositados en el vertedero, la reducción del potencial de generación de gases contaminantes (metano o gases de olor fétido) y de la carga orgánica de los líquidos lixiviados en los vertederos, además de la producción de un compuesto orgánico que mejora la estructura del suelo, disminuyendo los procesos erosivos y aumentando la eficiencia de absorción de los fertilizantes minerales (Reichert et al., 2014).

El compost contiene muchos nutrientes esenciales y mejora las propiedades físicas y químicas del suelo, aumentando así la productividad del campo, el crecimiento de plantas y plantaciones de cultivos (Zulkepli, N. E. et al., 2017), por lo cual es beneficioso para el uso agrícola.

#### **4.2.4.3. BIOMETANIZACIÓN**

Según el Ministerio para la transición ecológica (2019) La biometanización o digestión anaerobia es un proceso biológico que, en ausencia de oxígeno y a lo largo de varias etapas en las que intervienen una población heterogénea de microorganismos, permite transformar la fracción más degradable de la materia orgánica en biogás, una mezcla de gases formada principalmente por metano y dióxido de carbono y por otros gases en menor proporción (vapor de agua, CO, N<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S,...).

El proceso de biometanización comienza con la preparación de la materia orgánica recuperada, esta materia es triturada y mezclada con agua y arena formando una especie de caldo. A continuación, se alimenta el biodigestor o digestor anaeróbico.

El biodigestor o digestor anaeróbico es un recipiente cerrado en el cual se introduce la materia orgánica y se provoca la digestión anaerobia mediante unos bacilos, que aceleran la producción de gas metano.

El siguiente paso es la recogida y deshidratación de los residuos digeridos y por otro lado la captación y almacenaje del biogás. También son tratadas la fracción líquida del digestato y de otras aguas residuales generadas.

El biogás producido y almacenado puede ser utilizado para la cogeneración de calor y electricidad, además de poderse purificar e inyectar en la red de distribución de gas o ser utilizado en vehículos.

#### 4.2.4.4. *TRATAMIENTO TÉRMICO*

El tratamiento térmico de los residuos sólidos es cualquier proceso destinado a la transformación de los residuos mediante la aplicación de energía calorífica (incineración). Según Reichert et al. (2014) la quema de residuos sólidos permite obtener cuatro tipos de ventajas:

- **Reducción de volumen:** Dependiendo de la composición de los residuos, el volumen puede reducirse hasta en un 90%, mientras que la disminución en la masa varía de 70 a 75%. Este método es importante para países o ciudades con poco espacio para vertederos.
- **Estabilización de residuos:** el material que sale del incinerador (ceniza) se considera mucho más inerte que el material entrante, lo que reduce el biogás y la generación orgánica presente en lixiviados cuando este material se deposita en vertederos.
- **Recuperación de energía residual:** Todas las plantas de incineración de RSD deben tener un sistema de generación de energía, para que sean energéticamente autosuficiente.
- **Esterilización de residuos:** al quemar los residuos se destruyen las enfermedades infecciosas contagiosas y patógenas.

Los desechos más apropiados para la incineración son orgánicos con bajo contenido de humedad y alto poder calorífico. El valor del poder calorífico aproximado de los RSD es de 10 MJ / kg.

#### 4.2.5. DISPOSICIÓN FINAL

La disposición final de los residuos es la última etapa del sistema de gestión. El vertedero es el lugar para la su eliminación mediante su enterramiento. En estos espacios, los residuos son dispuestos en el suelo sin causar daños a la salud pública, minimizando los impactos ambientales, y optimizando su disposición para confinar los desechos sólidos en el área más pequeña posible. En los vertederos, la basura es cubierta con tierra después de cada deposición para evitar malos olores o la atracción de animales, y cuenta con un sistema de impermeabilización en la parte inferior.

Generalmente, en el vertedero se depositan desechos con gran cantidad de materia orgánica. Los compuestos orgánicos allí dispuestos se oxidan aeróbicamente cerca de la superficie y se realiza una digestión anaeróbica de material orgánico por debajo de la superficie del vertedero, ya que la circulación de aire desde la atmosfera se minimiza (Chai et al., 2016).

La descomposición de basura bajo tierra sin la exposición a oxígeno produce la emisión de gases de vertedero, principalmente, metano (45 - 60% en volumen), dióxido de carbono (40 - 60%) y nitrógeno (2 - 5%) (Mehta et al., 2018) que agravan el efecto invernadero y el cambio climático global. El metano es el segundo gas de efecto invernadero más abundante (Chai et al., 2016) y tiene una mayor contribución al efecto invernadero debido a su potencial de calentamiento global que supera en 21 veces al CO<sub>2</sub> (IPCC, 2013).

El control que se tenga sobre el vertedero es esencial para poder mitigar el impacto ambiental que este produzca. El sellado del vertedero consiste en construir una barrera física entre el seno del vertedero, los residuos y los agentes externos medioambientales. Esta barrera está compuesta por varias subcapas de áridos y una lámina de polietileno de alta densidad. Encima de ésta, se instala una lámina de geotextil para drenar los líquidos filtrados desde capas superiores. Debe preverse la construcción de una balsa de recogida de lixiviado para su posterior tratamiento.

Como se ha explicado la descomposición de la materia produce gases de vertedero, por lo que la extracción y tratamiento de estos gases será un elemento importante para reducir su impacto ambiental.

Los pozos de recolección vertical son un medio eficaz y comúnmente utilizado para recuperar los gases y devolverlos limpios a la atmósfera, reduciendo de esta forma la contribución al calentamiento global.

Cabe señalar como en muchos países en desarrollo, como es el caso de Brasil, la disposición final de los residuos se realiza en vertederos no controlados, es común deshacerse de los desechos en zanjas, vertederos sin impermeabilización o sin cualquier cuidado medioambiental. Afortunadamente, esta tendencia está cambiando, en Brasil el porcentaje de residuos correctamente depositados en el vertedero está aumentando año tras año (Ghesla etl al., 2018).

## 4.3. MARCO NORMATIVO DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS EN BRASIL

### 4.3.1. POLÍTICA NACIONAL DE RESIDUOS SÓLIDOS BRASILEÑA

La Política Nacional de Residuos Sólidos (PNRS), instruida a través de la ley Nº 12.305/2010, promueve la gestión integrada sostenible de los residuos sólidos en Brasil y fue aprobada en el congreso en el año 2010.

Esta Ley establece un marco regulatorio completo para el sector de residuos sólidos a nivel nacional, definiendo los principios, objetivos, directrices, metas y acciones con vistas a la gestión integrada y al manejo ambientalmente adecuado de los residuos sólidos (Ley no 12.305, 2010).

La gestión de residuos sólidos viene definida como el conjunto de acciones ejercidas, directa o indirectamente, en las etapas de **recogida**, transporte, transbordo, tratamiento y destino final ambientalmente de acuerdo con el plan municipal de gestión integrada de residuos sólidos (Ley no 12.305, 2010).

Con esta ley se prevé la reducción en la generación de residuos teniendo como propuesta la práctica de hábitos de consumo sostenible y un conjunto de instrumentos para propiciar el aumento del reciclado y la reutilización de los residuos sólidos, así como un tratamiento de una disposición final ambientalmente adecuada de estos (Ley no 12.305, 2010).

Esta ley crea acciones y metas importantes como la eliminación de los vertederos ilegales, implanta la recogida selectiva de los residuos, el reciclaje de los materiales valorizables y el compostaje de los residuos húmedos. Así como, la necesidad de mejorar las condiciones sociales y económicas de los catadores, estos son catadores informales que recogen residuos reciclables en sistema de gestión de RSD, sin disponer de ningún tipo de medidas de seguridad e higiene a nivel laboral o económicas y teniendo la responsabilidad sobre el proceso de recogida y los equipos o herramientas utilizados para su desarrollo (Ley no 12.305, 2010).

Además, la PNRS impone que los municipios elaboren sus propios planes municipales de gestión tales como el Plano Municipal de Gestión integrada de Residuos Sólidos de João Pessoa - PMGIRS (Ley no 12.305, 2010).

### 4.3.2. PLAN MUNICIPAL DE GESTIÓN DE RESIDUOS DE JOÃO PESSOA

El modelo de gestión de los RSD tiene como objetivo buscar la eficiencia y eficacia de este servicio. El modelo adoptado en el municipio de João Pessoa incluye el servicio de limpieza urbana, la colaboración ciudadana y la inserción social de los catadores.

El Plan Municipal de Gestión Integrada de Residuos Sólidos (PMGIRS) debe abarcar todo el ciclo del SGR, desde la generación de los residuos hasta la eliminación ambiental final de los mismos. Para ello, dicho Plan responsabiliza las empresas del sector público y del sector privado, propietarios, consumidores y ciudadanos, en la adopción de soluciones que minimicen los efectos negativos sobre la salud pública y el medio ambiente en cada etapa del "ciclo de vida" del producto.

El PMGIRS define tres tipos de directrices: Directrices Principales, Directrices Generales y Directrices Específicas. Estas directrices, descritas a continuación, están alineadas en un horizonte de planificación como el que se muestra en la Figura 2:



Figura 2. Horizonte de planificación de las Directrices del PMGIRS.  
(João Pessoa, 2014)

#### Directriz Principal

De acuerdo con uno de los objetivos de la PNRS, establecido a través de Ley 12305/2010, la directriz principal de PMGIRS es la no generación, reducción, reciclaje y tratamiento de Residuos sólidos, así como la eliminación ambientalmente adecuada de los residuos (Ver Figura 3).



Figura 3. Directriz Principal del PMGIRS. Fuente: (PMGIRS João Pessoa, 2014)

#### Directrices Generales

En base a la directriz principal fueron también definidas y aprobadas quince directrices generales. Estas directrices son las siguientes:

1. No generación y reducción de los RSU

2. Reutilización de los RSU
3. Servicio al 100% de la población urbana ay rural en la recogida de RSD
4. Servicio al 100% de la población que reside en calles pavimentadas con servicios públicos de limpieza.
5. Planificar, readecuar e implantar la recogida de residuos secos en todos los barrios del municipio.
6. Planificar e implantar la recogida de residuos húmedos.
7. Reducción de la cantidad de residuos secos dispuestos en el vertedero.
8. Reducción de la cantidad de residuos húmedos dispuestos en el vertedero.
9. Recuperación ambiental de los residuos de Roger (Vertedero no controlado)
10. Tratamiento de RSU con tecnologías ambientalmente adecuadas e económicamente viables
11. Disposición ambientalmente adecuada de los residuos en los vertederos sanitarios.
12. Inclusión socioeconómica de los catadores de materiales reciclables
13. Sustentabilidad economía del servicio público de limpieza urbana y manejo de residuos sólidos.
14. Formación técnica continúa en el área de residuos sólidos.
15. Monitoreo y control de las acciones del PMGIRS.

### Directrices Específicas

Además de las Directrices Principales y las Directrices Generales, el PMGIRS propone una serie de Directrices Específicas para los Residuos Sólidos Urbanos, en los cuales están englobados los RSD, que son los residuos tratados en el presente trabajo:

- Directriz Específica 1. Reducir la generación de los RSU.
- Directriz Específica 2. Reducir la disposición de los RSU secos en los vertederos.
- Directriz Específica 3. Reducir la disposición de los RSU húmedos en los vertederos, incentivando y promoviendo el compostaje.
- Directriz Específica 4. Promover la disposición final ambientalmente adecuada de residuos.
- Directriz Específica 5. Mejorar la segregación de la porción húmeda de los RSU.
- Directriz Específica 6. Promover la caracterización de los RSU generados en el municipio de João Pessoa cada dos años, a partir de 2015.

Para cumplir con todas las directrices propuestas en el PMGIRS se han elaborado una serie de estrategias y metas. En el siguiente apartado se muestran las metas más importantes.

#### 4.3.2.1. METAS DEL PLAN NACIONAL DE RESIDUOS SOLIDOS PARA 2031 y 2034

A continuación, se muestran las principales metas establecidas en el Plan Municipal de Gestión Integrada de Residuos Sólidos de João Pessoa con el fin de cumplir con las Directrices Generales y Específicas que requieren una reducción de la cantidad de residuos secos y húmedos dispuestos en el vertedero.

En la Tabla 1 se muestran las metas y plazos para la reducción de los Residuos Sólidos Secos en los vertederos para el municipio de João Pessoa. Concretamente, la Tabla 1 muestra la proporción de residuos secos que se deben reciclar, progresivamente desde el 2015 hasta el 2031, para conseguir reducir la cantidad depositada en los vertederos, y así reducir el impacto ambiental que se genera allí con la descomposición de la materia orgánica.

2015	2019	2023	2027	2031
3%	9%	13%	19%	25%

*Tabla 1. Metas y plazos para la reducción de los residuos secos dispuestos en el vertedero.*

*Fuente: (PMGIRS João Pessoa, 2014)*

En la Tabla 2 se muestran las metas y plazos para la reducción de los Residuos Sólidos Húmedos en los vertederos para el municipio de João Pessoa. Concretamente, la Tabla 2 muestra el porcentaje de materia orgánica que debería ser tratada y compostada desde el 2017 hasta el 2034 en João Pessoa, para reducir su impacto ambiental en los vertederos.

2015	2019	2023	2027	2031	2034
2%	10%	20%	30%	40%	50%

*Tabla 2. Metas y plazos para la reducción de la disposición de RSD Húmedos en el vertedero de João Pessoa.*

*Fuente: (PMGIRS João Pessoa, 2014).*

Para el cumplimiento de estas directrices se van a proponer y analizar ambientalmente, a lo largo del presente trabajo, diferentes proposiciones de mejora del SGR de João Pessoa. El objetivo de las acciones propuestas es que permitan alcanzar las metas mediante la reducción de la cantidad de residuos, aún pasibles de aprovechamiento, a ser dispuestos en vertederos para, consecuentemente, reducir su impacto medioambiental.



## 4.4. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA DE ANÁLISIS DEL CICLO DE VIDA

La metodología de Análisis del Ciclo de Vida (ACV) es una herramienta que permite evaluar el comportamiento ambiental de un sistema a lo largo de todo su ciclo de vida. La definición propuesta por la ISO 14040-44 (2006):

*“El ACV es un proceso objetivo para evaluar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad identificando y cuantificando el uso de materia y energía y los vertidos al entorno; para determinar las consecuencias que ese uso de recursos y esos vertidos producen en el medio ambiente, y para evaluar y llevar a la práctica estrategias de mejora ambiental.”*

El esquema de la estructura del ACV que propone la norma se refleja en la Figura 4:

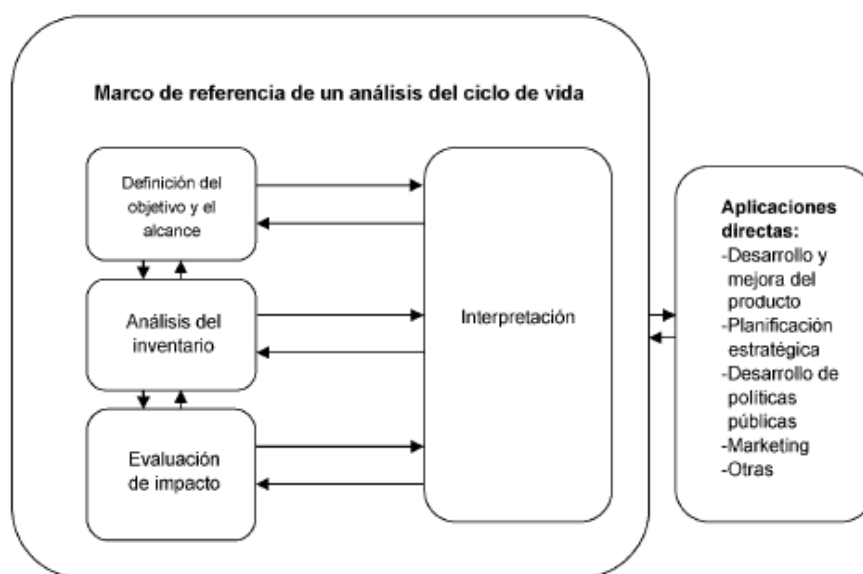


Figura 4. Estructura del ACV. Fuente: (L. Márquez, 2011).

El Análisis del Ciclo de Vida es la herramienta más aceptada internacionalmente para cuantificar los impactos ambientales de los sistemas de gestión de residuos sólidos domiciliarios (Ibáñez-Forés et al., 2018) ya que se trata de un método cuantitativo que permite evaluar e identificar la mejor opción ambiental en la gestión de residuos (Angelo et al., 2017).

En la última década ha habido un aumento sustancial correspondiente en el número de publicaciones utilizando esta metodología (Angelo et al., 2017).

### 4.4.1. ETAPA I: DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE

La primera etapa en todo ACV es determinar los objetivos y el alcance del estudio. De acuerdo a las indicaciones de la norma ISO 14040-44 (2006), esta etapa a su vez puede subdividirse en las siguientes fases:

- **Definición de objetivos:** Debe incluir cual es la razón para realizar un estudio de este tipo, así como la aplicación que se prevé dar a los resultados.
- **Definición del alcance:** Define el ámbito de aplicación del estudio, límites del sistema, requerimientos de datos y categorías de datos que se van a utilizar, hipótesis, etc. El alcance debería estar suficientemente bien definido para asegurar que la profundidad y el nivel de detalle del estudio sean compatibles y suficientes para alcanzar el objetivo establecido.
- **Definición de la unidad funcional:** Es aquella a la que irán referidas todas las entradas y salidas del sistema. Es necesaria su definición para poder realizar una comparación entre varios sistemas que realizan la misma función.
- **Requisitos de calidad de los datos:** Es necesario establecer las características de los datos necesarios para el estudio. La calidad de los datos es importante para comprender la fiabilidad de los resultados del estudio e interpretar correctamente los resultados del estudio.

La técnica de ACV es iterativa, y mientras se recopilan los datos e información, pueden tener que modificarse diversos aspectos del alcance para cumplir con el objetivo original del estudio.

#### 4.4.2. ETAPA II: INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA

Según la norma UNE-EN ISO 14040 (2006) y 14044 (2006), la configuración del Inventario del Ciclo de Vida (ICV) implica la recopilación de los datos para cuantificar las entradas (energía, de materia prima y los productos) y salidas (los residuos, las emisiones al aire, los vertidos al agua y suelo) de cada una de las etapas que configuran el sistema objeto de estudio.

Los datos a incluir en el ICV deben recopilarse para cada proceso unitario incluido dentro de los límites del sistema y han de estar referido a la unidad funcional que se ha definido. Para ello, puede recurrirse a recopilarlos a partir de datos de campo o utilizar bases de datos de ICV, públicas o comerciales. De acuerdo a Ibáñez-Forés et al. (2018), las bases de datos más utilizadas para la evaluación de SGR en países emergentes son diferentes versiones de Ecoinvent v2 (Ecoinvent Centre, 2007, 2014), otras bases de datos incluidas en el software de ACV SimaPro (PRé Consultants, 2015) o Gabi (Gabi PE International, 2010).

Es la etapa más costosa en cuanto a consumo de recursos y más crítica de cualquier estudio de ACV, ya que de la calidad de los datos de inventario dependerá la calidad de los resultados que se obtengan.

##### *Calidad de los datos del inventario*

Cualquier análisis del ciclo de vida que se realice requiere la utilización de un gran número de datos individuales procedentes de diferentes fuentes. Por tanto, la calidad y la credibilidad de los resultados del estudio dependerán en gran medida de la calidad de los datos tomados como partida.

Algunos ejemplos de indicadores de calidad, son:

- Fuentes de la información: Los datos pueden ser primarios (datos de campo), de la literatura o de una base de datos.
- Método de **recogida** de datos: Método de obtención de los datos del estudio.
- Edad de los datos: Antigüedad de los datos y período de tiempo mínimo en el que se deberían recopilar los datos.
- Geografía: Área geográfica en donde se deberían recopilar los datos para satisfacer el objetivo del estudio.
- Tecnología. Tecnología específica o mezcla de tecnologías.

### 4.4.3. ETAPA III: EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA

La fase de Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida (EICV) tiene como propósito evaluar cuán significativos son los impactos ambientales utilizando los resultados de la etapa del inventario. El objetivo de esta etapa no es determinar el valor real de los impactos, sino más bien relacionar los datos del inventario con una serie de categorías de impacto ambientales específicas definidas previamente, y cuantificar la magnitud relativa de la contribución de cada contaminante a la categoría de impacto correspondiente.

Para ello, los datos de ICV, es decir, todas las entradas y salidas de materia y energía en cada una de las etapas que configuran el ciclo de vida del sistema bajo estudio, deben modelarse con un software de ACV. Entre los más utilizados destacan el SimaPro (PRé Consultants, 2015) or Gabi (Gabi PE International, 2010).

Los resultados de una EICV pueden utilizarse para identificar oportunidades de mejora, caracterizar o comparar variaciones de un sistema de productos en el tiempo, comparar sistemas diferentes de producto e identificar variables medioambientales críticas.

Según la norma ISO 14040-44 (2006), el análisis de impacto puede realizarse con elementos obligatorios u opcionales. Los elementos obligatorios permiten obtener un indicador para cada una de las categorías de impacto ("mid-point"). Por otro lado, los elementos opcionales permiten obtener un único indicador que engloba toda la información mediante la aplicación de un método de evaluación del impacto ("end-point").

A continuación, se describen los elementos obligatorios y opcionales, incluyendo la descripción de los principales indicadores a obtener en cada caso.

#### 4.4.3.1. *Elementos obligatorios. Análisis por categoría de impacto.*

En esta fase del EICV se seleccionan las categorías de impacto, los indicadores de categoría y los modelos de caracterización que se van a considerar. A continuación, se asignan los resultados del ICV a las categorías de impacto (clasificación) y se calculan los resultados de los indicadores para cada una de las categorías de impacto consideradas.

Las categorías que se van a utilizar en este estudio son las propuestas por el método CML (GUINEE, 2002), que se muestran en la Tabla 3:

Categoría de impacto	Unidad
Acidificación	<i>kg de SO<sub>2</sub> eq</i>
Eutrofización	<i>kg de PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> eq</i>
Calentamiento Global	<i>kg de CO<sub>2</sub> eq</i>
Oxidación Fotoquímica (Smog fotoquímico)	<i>kg de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq</i>
Destrucción de la capa de ozono	<i>kg de CFC-11 eq</i>

Tabla 3. Categorías de impacto y unidades utilizadas propuestas por el método 2000.

Fuente: (L. Márquez, 2011).

A continuación, se describe cada una de las categorías de impacto:

- **Acidificación:** Es esta categoría se engloban las emisiones ácidas a la atmósfera que provocan la *lluvia ácida*. Las sustancias acidificantes pueden provocar una amplia variedad de impactos sobre el suelo, las aguas subterráneas y superficiales, sobre los organismos, ecosistemas y materiales. La acidificación se expresa en *kg de SO<sub>2</sub> eq*.
- **Eutrofización:** Incluye todos los impactos debidos a niveles excesivos de nutrientes (nitrógeno y fósforo) en el medioambiente, causados por emisiones de los mismos al aire, agua y suelo. Se expresa en *kg de PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> eq*.
- **Calentamiento Global:** Es la cantidad de emisiones de CO<sub>2</sub> y otros gases de efecto invernadero se les considera causantes del calentamiento del planeta. Como unidad se utiliza el *kg de CO<sub>2</sub> eq* que supone un volumen de emisión de gas de efecto invernadero equivalente a una tonelada de CO<sub>2</sub>.
- **Oxidación Fotoquímica (Smog fotoquímico):** Supone la formación de ozono troposférico, un agente muy oxidante y causante del *smog*, una sustancia muy nociva para la salud humana y los ecosistemas. Se expresa en *kg de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq*.
- **Destrucción de la capa de ozono:** Incluye aquellos contaminantes que contribuyen a la reducción de la capa de ozono, las emisiones de CFC y otros gases degradantes de las capas altas de la atmósfera (estratosfera). Sus unidades son *kg de CFC-11 eq*.

#### 4.4.3.2. Elementos opcionales: Descripción de los métodos de valoración del impacto

La aplicación de un método de evaluación de impacto permite expresar la carga ambiental del sistema analizado en un único indicador. En este método los resultados para cada categoría de impacto se agrupan hasta obtener un único valor de impacto ambiental.

Algunos ejemplos de métodos de evaluación de impacto se muestran en la Tabla 4:

Método	Referencia
Eco-Indicator'95	Goedkoop (1995)
Eco-Indicator'99	Goedkoop y Spriensma (2000)
Eco-Scarcity 2006	Frischknecht et ál. (2006)
EDIP 2003	Hauschild y Potting (2004)
IMPACT 2002+	Jolliet et ál. (2003)
TRACI	Bareet et ál. (2003)
EPS 2000	Steen (1999)
CML 2000	Guinee (2002)
LIME	Itsubo et ál. (2004)
ReCiPe Endpoint	Huijbregts et al. (2017)

*Tabla 4. Métodos de valoración del impacto opcionales. Fuente: Propia*

Al no existir consenso en la utilización de un único método de evaluación del impacto, la norma ISO 14040-44 (2006) recomienda aplicar diferentes métodos de evaluación y realizar un análisis de sensibilidad para evaluar cómo influye el método aplicado en los resultados del estudio.

El análisis de sensibilidad muy útil para distinguir si existen diferencias significativas entre los diferentes sistemas evaluados en el ACV, ya que muestra los resultados en una sola categoría de impacto.

Además facilita la comprensión del Impacto ambiental del sistema estudiado ya que al unificar las diferentes categorías de impacto en una solamente, el resultado es más comprensible.

#### 4.4.4. ETAPA IV: INTERPRETACIÓN DEL CICLO DE VIDA

Según la norma UNE-EN ISO 14040 (2006) y 14044 (2006), esta es la fase del ACV en la cual los hallazgos del análisis del inventario y de la evaluación de impacto se consideran y analizan juntos. La fase de interpretación debería proporcionar resultados que sean coherentes con el objetivo y el alcance definidos, que lleguen a conclusiones, expliquen las limitaciones y proporcionen recomendaciones.

La interpretación debería reflejar el hecho de que los resultados de la EICV están basados en un enfoque relativo, indican efectos ambientales potenciales, no predicen los impactos reales en los puntos finales de categoría, ni si se sobrepasan los umbrales, los márgenes de seguridad ni los riesgos.

## 5. METODOLOGÍA DE ESTUDIO

El proceso metodológico aplicado en el presente Trabajo Final de Máster, representado en la Figura 5, se divide en cuatro grandes bloques que se describen a continuación:

### BLOQUE I: ANÁLISIS DEL SGR BAJO ESTUDIO

- Descripción del caso de estudio
- Descripción del Sistema de Gestión de Residuos de Joao Pessoa
- Caracterización del SGR en Joao Pessoa
- Evaluación del SGR de Joao Pessoa
- Análisis comparativo del comportamiento del SGR con respecto a las metas normativas

### BLOQUE II: IDENTIFICACIÓN DE LOS ASPECTOS DE MEJORA Y PROPUESTAS DE ESCENARIOS ALTERNATIVOS

- Identificación de las capitales Brasileñas con mejores Índices de Recuperación de Residuos Reciclables
- Descripción de la gestión de residuos en las ciudades identificadas
- Análisis de resultados e identificación de la propuesta de mejora
- Configuración de Escenarios Alternativos

### BLOQUE III: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ACV AL CASO DE ESTUDIO

- Definición de objetivo y alcance
- Elaboración del Inventario del Ciclo de Vida
  - Escenario base
  - Escenarios alternativos
- Evaluación del Impacto Ambiental del Ciclo de Vida
  - Análisis del impacto asociado a las etapas del sistema de gestión de residuos
  - Análisis del impacto asociado al flujo de materiales recogidos mediante recogida selectiva vs. recogida convencional
  - Análisis comparativo del impacto de los escenarios propuestos
  - Análisis de sensibilidad
- Interpretación de los resultados

### BLOQUE IV: ANÁLISIS DEL ESCENARIO ÓPTIMO

- Análisis del cumplimiento de la normativa
- Análisis de la Eco - Eficiencia

Figura 5. Metodología seguida del presente Trabajo Final de Master.

## **BLOQUE I: MODELADO DEL SGR DE RSD DE JOÃO PESSOA**

El primer bloque se trata de un análisis completo del SGR de João Pessoa. Primero que todo, se realiza una revisión de la literatura relacionada con la gestión de residuos en Brasil y más concretamente en João Pessoa con la intención de poder describir el Sistema de Gestión de Residuos lo más precisa posible.

Tras analizar y describir el sistema de gestión, se procederá a recopilar todos los datos de los flujos de los residuos que se tratan en cada una de las etapas del SGR entre el 2016 y 2018, para el mejor manejo y comprensión de los datos se diseñan unos flujogramas.

Una vez está claro el SGR y sus datos en el periodo de tiempo citado, se realizará su caracterización, es decir se evalúa su evolución. De esta forma, se obtiene una imagen de cómo está funcionando el SGR en João Pessoa y además se comparará la tendencia evolutiva del SGR con las metas establecidas durante los próximos años hasta 2031 y 2034. Y se justificará la necesidad de mejora el sistema de gestión.

## **BLOQUE II: IDENTIFICACIÓN DE LOS ASPECTOS DE MEJORA Y PROPUESTAS DE ESCENARIOS ALTERNATIVOS**

En este bloque se definen las mejoras que deben implementarse en el sistema de gestión que hay implantado actualmente en João Pessoa. Para poder determinarlas, primero que todo se realiza una revisión bibliográfica y un análisis descriptivo de los SGR de las ciudades que tienen mejores ratios de reciclabilidad. Para ello se utilizarán los datos Sistema Nacional de Informação sobre saneamiento (SNIS, 2018).

Una vez analizados los sistemas de gestión de las ciudades Brasileñas con mejor comportamiento en materia de recuperación de residuos, se valorará que medidas que no están siendo realizadas en João Pessoa o se realizan de forma diferente y que por lo tanto, pueda ser el motivo de sus ratios de recuperación más bajos. Con la identificación de estas medidas se realizará la propuesta de mejoras para el SGR de João Pessoa.

Cuando las mejoras están identificadas, hay que situarlas en los escenarios. Por lo tanto se diseñarán ocho escenarios alternativos con diferentes combinaciones de las mejoras propuestas. Además para los escenarios, se calcularán todos los flujos de los residuos en cada una de las etapas.

## **BLOQUE III: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ACV AL CASO DE ESTUDIO**

Una vez definidos todos los escenarios se procede al cálculo del impacto ambiental del ciclo de vida. Para ello se debe definir primero que todo, el objetivo, el alcance y la unidad funcional, es decir, la razón por la que se realiza el estudio, los límites del sistema y a que unidades se va a referenciar.

También se elaborará el inventario, lo cual implica la recopilación de los datos de entradas (energía, de materia prima y los productos) y salidas (los residuos, las emisiones al aire, los vertidos al agua) pertinentes del sistema.

Con todos los datos ya recopilados, cuantificados y adaptados a la unidad funcional, se procederá al cálculo, evaluación e interpretación de los resultados del impacto ambiental del escenario

actual y de los escenarios propuestos. El modelado del inventario para cada escenario y los cálculos y obtención de indicadores ambientales se realizarán mediante el software de ACV SimaPro (PRé Consultants, 2015).

Se realizaran diferentes tipos de análisis para determinar cuál es el escenario ambientalmente óptimo. Los análisis que se realizarán son:

- Análisis del impacto asociado a las etapas del sistema de gestión de residuos. Donde se analizará en cada una de las categorías de impacto cuáles son sus efectos en cada una de las etapas del SGR.
- Análisis del impacto asociado al flujo de materiales recogidos mediante recogida selectiva vs. recogida convencional. En este análisis se comprará el impacto que produce la recogida selectiva con todos los procesos que le siguen a los residuos recogidos con la recogida convencional y todos los procesos que le siguen a esta.
- Análisis comparativo del impacto de los escenarios propuestos. En este apartado simplemente se compararan los impactos ambientales de cada escenario.
- Análisis de sensibilidad. Para finalizar se realizara este análisis, el cual agrupa los resultados de cada categoría de impacto para obtener un único valor, el cual servirá de indicador para asegurarse que los resultados de los análisis anteriores son coherentes.

Tras la evaluación e interpretación de los datos se acabará determinando cual es el escenario ambientalmente óptimo.

#### **BLOQUE IV: ANÁLISIS DEL ESCENARIO ÓPTIMO**

Una vez se ha establecido la alternativa óptima se realizará un estudio ambiental y económico.

En primer lugar se realizará una validación de la normativa del escenario óptimo, que cumple con las metas establecidas por el PNGIRS hasta el 2031 y el 2034.

A continuación se realizará un análisis de la Eco-Eficiencia, para ello el primer paso es realizar un análisis ambiental basándose en los resultados obtenidos en ACV calculado y evaluado en el Bloque anterior.

Tras el análisis ambiental, se calcularán los costes operativos del SGR para el Escenario BASE y el Escenario Óptimo. Con estos valores y los valores del análisis de sensibilidad se estudiará si la mejora implementada merece la pena desde los puntos de vista medioambiental y económico, los resultados se visualizarán, mediante un diagrama de Eco-Eficiencia

Por último se realizará una conclusión del Trabajo Final de Master.



## 6. BLOQUE I: ANÁLISIS DEL SGR BAJO ESTUDIO

### 6.1. DESCRIPCIÓN DEL CASO DE ESTUDIO

#### 6.1.1. DESCRIPCIÓN DE LA CIUDAD DE JOÃO PESSOA

La ciudad de João Pessoa está ubicada en el estado de Paraíba, en el punto más oriental de la costa noreste de Brasil, tal y como muestra la Figura 6. La ciudad tiene una altitud media de 37 m sobre el nivel del mar y el clima de la ciudad es del tipo mediterráneo (noreste seco), con una temperatura media anual de 26 °C. Está rodeado por diferentes ríos: Jaguaribe al norte, Gramame y Sanhauá al sur y Paraíba y Mumbaba al oeste.



Figura 6. Catadores en el vertedero ilegal recuperando materiales valorizables.

Fuente: (worldatlas.com, 2019)

Hoy en día, la ciudad ocupa una superficie de 211 km<sup>2</sup> y tiene una población de 801.718 habitantes (estimación PMGIRS João Pessoa ,2014) que generan más de 248.000 toneladas de Residuos Sólidos Domiciliarios (RSD) al año (Datos primarios del origen, 2018).

La gestión de los RSD en João Pessoa ha evolucionado a lo largo de la década pasada. En el año 2003 se produjo el cierre de las actividades del vertedero ilegal, donde iban destinados los residuos del municipio y donde catadores informales recogían con condiciones de higiene deficientes los materiales reciclables que posteriormente vendían para subsistir (Ver Figura 7).



Figura 7. Catadores en el vertedero ilegal recuperando materiales valorizables.

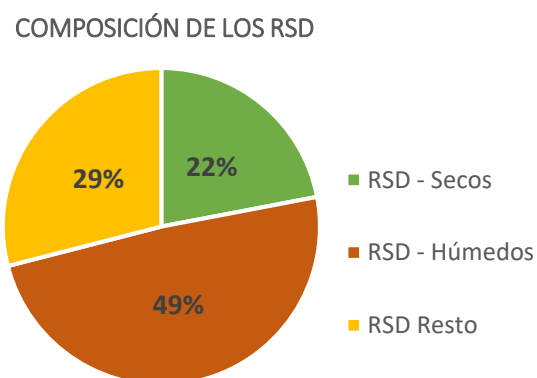
Fuente: (PMGIRS João Pessoa, 2014).

A partir de esa fecha, la necesidad de mejorar las condiciones socioeconómicas de los recicladores informales locales existentes llevó al desarrollo de una estrategia integrada del sistema de gestión, que los incluyó de forma reorganizada como asociaciones de recicladores.

Estos catadores se asociaron para recoger de forma selectiva los materiales reciclables puerta a puerta. De esta forma, pasaron a formar parte del sistema de gestión de residuos domiciliarios implantado por la *Empresa Especial Municipal de Limpeza Urbana* (EMLUR). João Pessoa fue uno de los municipios Brasileños pionero en incorporar la inclusión del “sector informal de recogida de residuos”, los denominados “catadores”.

### 6.1.2. GENERACIÓN DE RSD EN JOÃO PESSOA

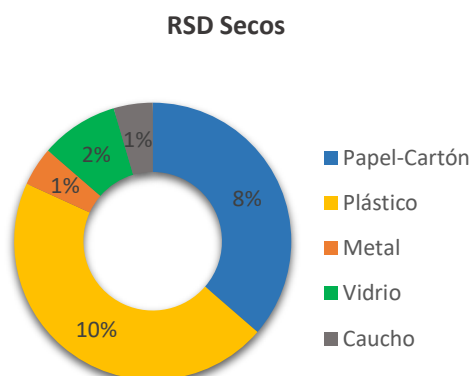
La empresa encargada de la gestión de residuos en João Pessoa (EMLUR) caracterizó en 2016 los Residuos Sólidos Domiciliarios producidos en João Pessoa, tal y como se muestra en la Figura 8:



*Figura 8. Composición gravimétrica de los residuos de João Pessoa.*

*Fuente: (EMLUR, 2016)*

Como se observa en la Figura 8, la composición es predominantemente de los residuos orgánica (49%). El 22% de los residuos secos están compuestos tal y como se muestra en la Figura 9, el plástico y el papel son los dos materiales valorizables más desechados por los habitantes de João Pessoa. Otro dato llamativo en la composición de los RSD secos es que según ELMUR la mayoría del caucho reciclado proviene de la goma utilizada en las chanclas de playa.



*Figura 9. Composición gravimétrica de los residuos de João Pessoa. Fuente: (EMLUR)*

## 6.2. SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS DE JOÃO PESSOA

Para entender cómo funciona el SGR de João Pessoa, es importante conocer la organización de la ciudad. João Pessoa está organizada en 63 distritos que están agrupados en 5 barrios. En cada uno de estos barrios se realiza la recogida de los residuos de forma independiente y hay ubicada una unidad de clasificación, también denominada Núcleo.

En el SGR de João Pessoa se diferencian seis etapas, tal y como muestra la Figura 10. Dichas etapas son: 1) Recogida y transporte inicial, 2) Clasificación de la recogida selectiva, 3) clasificación de la recogida de convencional, 4) almacenamiento y transportes intermedios, 5) valorización y, finalmente, 6) disposición final en vertedero.

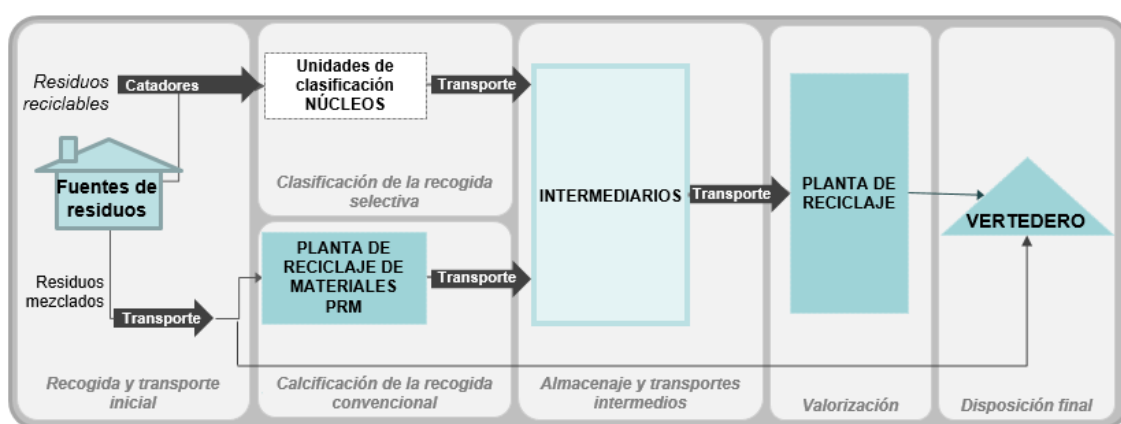


Figura 10. Sistema de gestión de residuos de João Pessoa. Fuente: Propia.

A continuación se describen cada una de las etapas del proceso del Sistema de Gestión de Residuos en João Pessoa.

### 6.1.1. RECOGIDA Y TRANSPORTE INICIAL

El sistema de gestión de residuos implementado en João Pessoa se basa en una combinación de la recogida selectiva de los residuos potencialmente reciclables como el papel, cartón, caucho y materiales de embalaje como vidrio, metal y plásticos son separados previamente en las casas, junto con la recogida convencional, donde los residuos no son separados previamente (residuos mezclados o mixtos, compuestos por materiales orgánicos y de inorgánicos).

#### 6.1.1.1. Recogida Selectiva y transporte a los núcleos

El programa de recogida selectiva se realiza mediante el sistema puerta a puerta, donde los habitantes ponen los residuos, separados previamente por su tipología, en pequeños contenedores o en bolsas plásticas frente a la residencia.

El método de recogida de residuos selectivos en esta ciudad sigue siendo muy precario. Solamente hay 3 camiones remolque como el que se muestra en la Figura 11.a que realizan el

17,3% de la ruta de recogida, el resto se realiza con equipos muy rudimentarios como carretas, motocicletas, carritos de tracción animal, etc. (Ver Figura 11.b).



Figura 11. Equipo utilizado para la recogida selectiva de residuos reciclables: a) camión remolque y b) Carrito de tracción animal. Fuente: Propia.

En la Tabla 5 se muestran el porcentaje y los kilómetros recorridos por camiones en los barrios de João Pessoa y en total.

Recogida y transporte inicial	Porcentaje uso camiones Selectiva	Ruta Recogida Selectiva (km)
Barrio dos Estados	10 %	17,26
Barrio Caic	20 %	18,60
Barrio Cabo Branco	20 %	28,39
Barrio Bessa	25 %	37,65
Barrio Mangabeira	15 %	33,94
<b>Total João Pessoa</b>	<b>17,32%</b>	<b>135,83 km</b>

Tabla 5. Porcentajes y kilómetros recorridos por vehículos a motor para la recogida selectiva en João Pessoa y sus barrios. Fuente: Propia.

El cálculo de los kilómetros recorridos durante la ruta de recogida cubriendo el 100% de la ciudad se explica en el ANEXO I. En el PLANO 1 se muestra las áreas cubiertas con camión durante la recogida selectiva.

Además de la recogida puerta a puerta, se está empezando a incorporar Puntos de Entrega Voluntaria - PEV's, donde los ciudadanos conducirán de forma voluntaria sus residuos potencialmente reciclables a contenedores específicos de cada tipología.

Los residuos reciclables recogidos selectivamente en cada barrio (Bessa, Cabo Branco, Bairro dos Estados, Caic y Mangabeira) se transportan a una de las 5 Unidades de Clasificación ubicada en cada barrio, donde los materiales recogidos son separados en base a su composición para su posterior reciclado. En el presente Trabajo Final de Master se han unificado los 5 núcleos en uno.

Dicha tarea es desarrollada por 68 recicladores reorganizados en las asociaciones que participan en la recogida selectiva puerta a puerta, distribuidos respectivamente en cada núcleo de clasificación.

### 6.1.1.2. Recogida Convencional y transporte a la PRM

La recogida de residuos domiciliarios mezclados (Recogida convencional) atiende por completo el municipio de João Pessoa. En las áreas urbanizadas se realiza mediante el sistema puerta a puerta utilizando rutas pre-establecidas. En las áreas de difícil acceso, donde no es posible la entrada de vehículos catadores, la población lleva sus residuos al contenedor más cercano.

Los residuos convencionales son recogidos y transportados mediante los servicios de limpieza, con vehículos de recogida del tipo camiones compactadores como los de la Figura 12.



Figura 12. Camiones utilizados para la recogida convencional.

Fuente: (PMGIRS João Pessoa, 2014).

En la Tabla 6 se exponen los porcentajes de uso de camiones y los kilómetros que realizan para recoger todos los residuos de la recogida convencional.

Recogida y transporte inicial	Porcentaje uso camiones Convencional	Ruta Recogida Convencional (km)
Barrio dos Estados	100 %	172,59
Barrio Caic	100 %	92,98
Barrio Cabo Branco	100 %	141,94
Barrio Bessa	100 %	150,58
Barrio Mangabeira	100 %	226,29
<b>Total João Pessoa</b>	<b>100 %</b>	<b>784,39</b>

Tabla 6. Porcentajes y kilómetros recorridos por vehículos a motor para la recogida convencional en João Pessoa y sus barrios. Fuente: Propia

El cálculo de los kilómetros recorridos durante la ruta de recogida cubriendo el 100% de la ciudad se explica en el ANEXO I.

Una vez todos los residuos convencionales están recogidos, se dirigen a la Planta de Recuperación de Materiales (PRM) donde los materiales valorizables se extraen y los desechos no reciclables acaban en el vertedero. Esta planta está situada a 25 km del centro de la ciudad, junto al vertedero.

### 6.1.2. UNIDAD DE CLASIFICACIÓN DE LA RECOGIDA SELECTIVA – NÚCLEOS

En los núcleos de clasificación son naves donde los residuos llegan separados por los habitantes de João Pessoa, en estas instalaciones los trabajadores se encargan de clasificarlos manualmente según la naturaleza del material del que estén hechos (Ver figura 13.a y 13.b).

La separación manual es la forma más simple, los operarios de los Núcleos separan de forma más precisa cada tipo de residuos (Papel y cartón, plástico, metales vidrio y caucho) y los depositan en recipientes específicos para cada material.



Figura 13. a) Almacén de triaje manual de la asociación ASCARE y b) Núcleo Bessa.

Fuente: (PMGIRS João Pessoa, 2014).

Una vez separados son empaquetados y prensados para ser vendidos a los intermediarios que los transfieren a sus respectivos almacenes intermedios (Ver Figura 14).



Figura 14. Prensa de papel y cartón utilizada en el Núcleo Bessa.

Fuente: (PMGIRS João Pessoa, 2014)

### 6.1.3. PLANTA DE RECUPERACIÓN DE MATERIALES (PRM)

En esta etapa los residuos son clasificados como valorizables o desechos. Esta es una de las fases más importante del ciclo de vida de los RSD, ya que estos residuos se presentan mezclados y su composición es muy heterogénea.

Los materiales reciclables se separan manualmente del flujo a desechar, los trabajadores se encargan de retirar el papel o cartón, plástico, vidrio, metal y el caucho del flujo de la cinta



transportadora y se dejan en ella el rechazados no reciclable. Actualmente esta planta ocupa a 85 de los recicladores reorganizados en las diferentes asociaciones.

Al final de esta etapa los materiales valorizables que se han recuperado son empaquetados y también vendidos a los intermediarios. El residuo rechazado acaba en el vertedero que se encuentra junto a esta instalación. Los datos que se detallan en el Apartado 6.1.6.

#### 6.1.4. ALMACENAJE Y TRANSPORTES INTERMEDIOS

Los materiales reciclables son llevados a los intermediarios, los cuales almacenan los materiales hasta que se transportan a sus respectivos recicladores finales, donde se reciclaran y se recuperaran como materias primas secundarias. Estos transportes se realizan con camiones remolque de 11 toneladas de capacidad.

#### 6.1.5. VALORIZACIÓN

En esta etapa se realizan las acciones y los procedimientos para la transformación del papel, cartón, metal, vidrio, algunos plásticos y caucho en materia prima secundaria, para que sea posible darles una segunda vida, y así poder reaprovecharlos en otros ciclos productivos.

Cada uno de estos materiales es dirigido a la industria de transformación o de reciclaje específica dirigida a cada material. En esta etapa es en la cual se producen los beneficios ambientales y económicos ya que una vez han sido tratados se venden como materia prima, evitando así el depositarlos en el vertedero. Cabe destacar que el 100% de los materiales que separados no es valorizable, siempre hay un inservible restante.

Hay que añadir que el reciclaje de los materiales, en la práctica, se da fuera de las fronteras del sistema de gestión de residuos sólidos domiciliarios de João Pessoa.

#### 6.1.6. DISPOSICIÓN FINAL. VERTEDERO

La etapa final de la gestión de residuos domiciliarios en João Pessoa consiste en la disposición de estos en el vertedero (ver Figura 15). Los desechos no valorizables son transportados al vertedero, donde a medida que se va depositando la basura, ésta es compactada y cubierta con una capa de tierra y otros materiales, sobre esta se deposita otra capa de basura y así sucesivamente hasta que el vertedero se dará por saturado.



Figura 15. Vertedero de João Pessoa. Fuente: (PMGIRS João Pessoa, 2014).

## 6.2. CARACTERIZACIÓN DEL SGR EN JOÃO PESSOA

En este apartado se ha recopilado todos los flujos de materiales que han sido gestionados en cada una de las etapas del SGR de João Pessoa, desde el año 2016 hasta el 2018. Dicha información ha sido proporcionada directamente desde la fuente, es decir, desde cada una de las plantas o instalaciones que actúan en el sistema de gestión (PRM, Núcleos, plantas de reciclaje y vertedero). La empresa facilitadora, que ha actuado como intermediaria ha sido la Empresa Municipal de Limpieza Urbana EMLUR.

Una de las principales desventajas que existen al realizar estudios de sistemas de gestión en países en desarrollo, es la falta de datos ya que estos países no tienen estándares específicos para esto, o la obligación de tenerlos. Por lo tanto, una de las principales contribuciones de este trabajo ha sido recoger de diferentes fuentes, los flujos de las diferentes fracciones de desechos en el municipio de João Pessoa durante los últimos tres años.

### 6.2.1. RECOGIDA DE DATOS CUANTITATIVOS DEL SGR

En la Tabla 7 se muestra los datos cuantitativos de todos los flujos de materia (RSD) que atraviesan el sistema de gestión de residuos estudiado durante los años 2016, 2017 y 2018. En la última columna, se indica la fuente de donde se han obtenido estos datos.

Cabe señalar que los datos de la recogida selectiva en cada uno de los cinco barrios de João Pessoa, se han unificado en un único valor, sumando el total de cada barrio.

	2016	2017	2018	Fuente
<b>Población (nº habitantes)</b>	798.864	811.422	823.980	<i>(PMGIRS JOÃO PESSOA, 2014)</i>
<b>Residuos generados (Tn)</b>	248.521	247.900	258.921	<i>Propia. Datos primarios del origen</i>
<b>Residuos Recogidos por la recogida selectiva (Tn)</b>	933,11	1.088,09	1.636,19	
Papel (tn)	483,29	688,85	768,57	
Plástico (Tn)	181,19	235,18	314,30	
Vidrio (Tn)	76,66	30,56	282,40	
Metal (Tn)	174,91	129,35	264,14	
Caucho (Tn)	17,06	4,15	6,78	



Residuos mixtos recogidos por la recogida convencional (Tn)	247.587,89	246.811,91	257.284,81	<i>Propia. Datos primarios del origen</i>
Residuos Recuperados en la PRM (Tn)	2.223,15	2.410,92	2.288,12	
Papel (Tn)	1.465,21	804,79	827,01	
Plástico (Tn)	648,38	1.331,18	1.009,56	
Vidrio (Tn)	1,53	1,27	25,83	
Metal (Tn)	70,93	152,66	311,01	
Caucho (Tn)	37,10	121,02	114,72	
Material valorizado	3.156,26	3.499,01	3.924,31	
Papel (Tn)	1.948,5	1.493,64	1.595,58	
Plástico (Tn)	829,57	1566,36	1323,86	
Metal (Tn)	245,84	282,01	575,15	
Vidrio (Tn)	78,19	31,83	308,23	
Caucho (Tn)	54,16	125,17	121,5	
Vertedero (Tn)	245.364,74	246.811,91	257.284,81	
Materia Orgánica (Tn)	121.775,3	121.471	126.871,3	
Papel (Tn)	17.933,18	18.338,36	19.118,1	
Plástico (Tn)	24.022,53	23.223,64	24.568,24	
Metal (Tn)	4.892,23	4.926,17	4.870,19	
Vidrio (Tn)	2.239,37	2.196,99	2.014,06	
Caucho (Tn)	2.431,05	2.353,83	2.467,71	
Resto (Tn)	72.071,09	71.891	75.087,09	

Tabla 7. Datos cuantitativos del sistema de gestión de residuos durante los años 2016, 2017 y 2018.

### 6.2.2. CALCULO DE FLUJOGRAMAS, TASAS DE RECOGIDA Y RECICLAJE

Con los datos expuestos en la Tabla 7 se ha elaborado el flujograma del Sistema de Gestión de Residuos para los años 2016, 2017 y 2018 (Figura 16, Figura 17 y Figura 18 respectivamente). Además, se han calculado las tasas de la recogida tanto selectiva como convencional, la eficiencia de la PRM y las tasas de reciclaje.

Tal y como se observa en los flujogramas, las mejores tasas de recogida y reciclaje ocurren en 2018 (Ver Figura 18), el 0,63% de la recogida total se trata de recogida Selectiva, la eficiencia de recuperación de la PRM es del 0,9% y la tasa de reciclaje que se produce en la ciudad es del 1,52%. Los datos del sistema de gestión de 2018 son los que se utilizarán para el Análisis del Ciclo de Vida como escenario BASE.

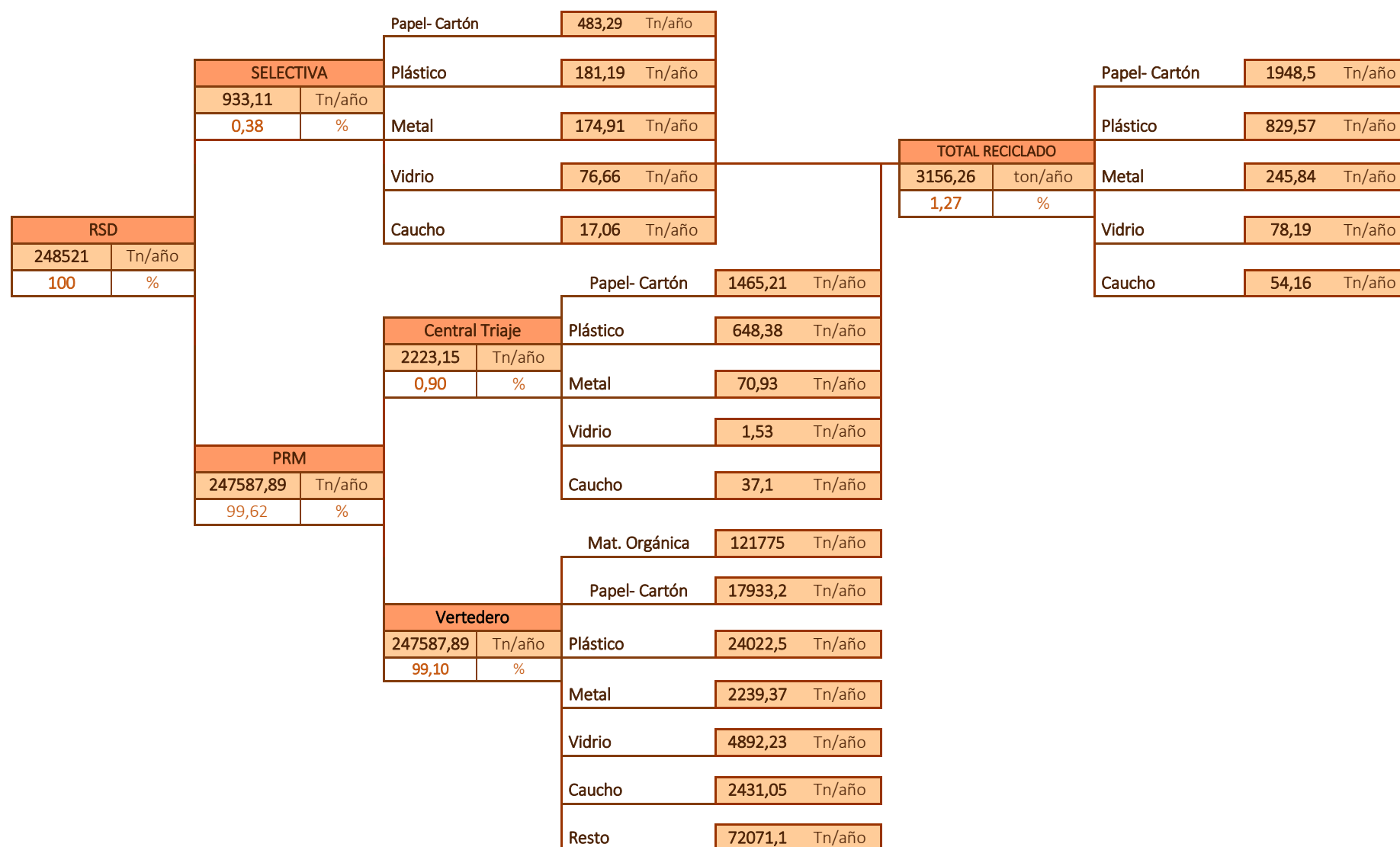


Figura 16. Flujograma del SGR de João Pessoa en 2016. Fuente: Propia

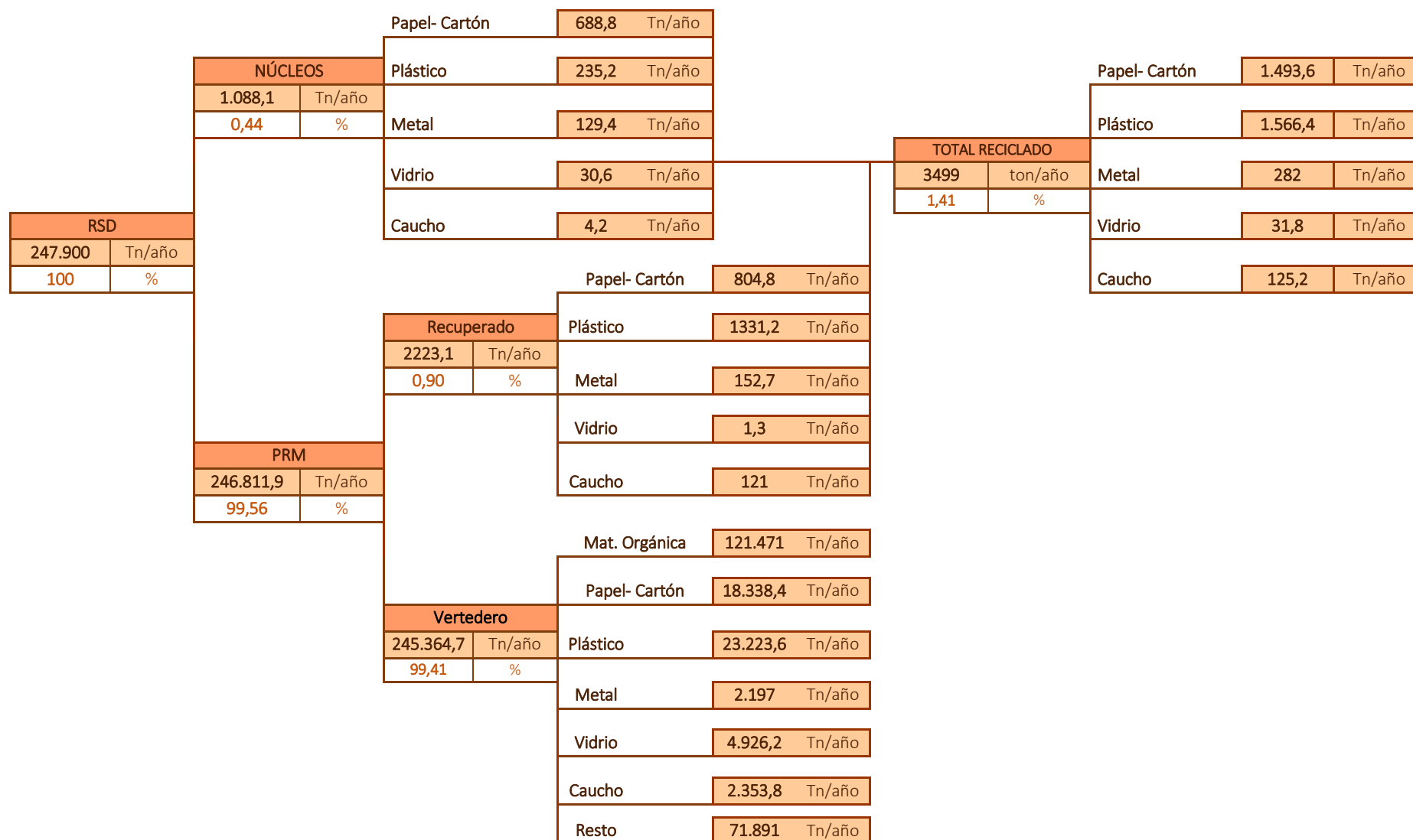


Figura 17. Flujograma del SGR de João Pessoa en 2017. Fuente: Propia.

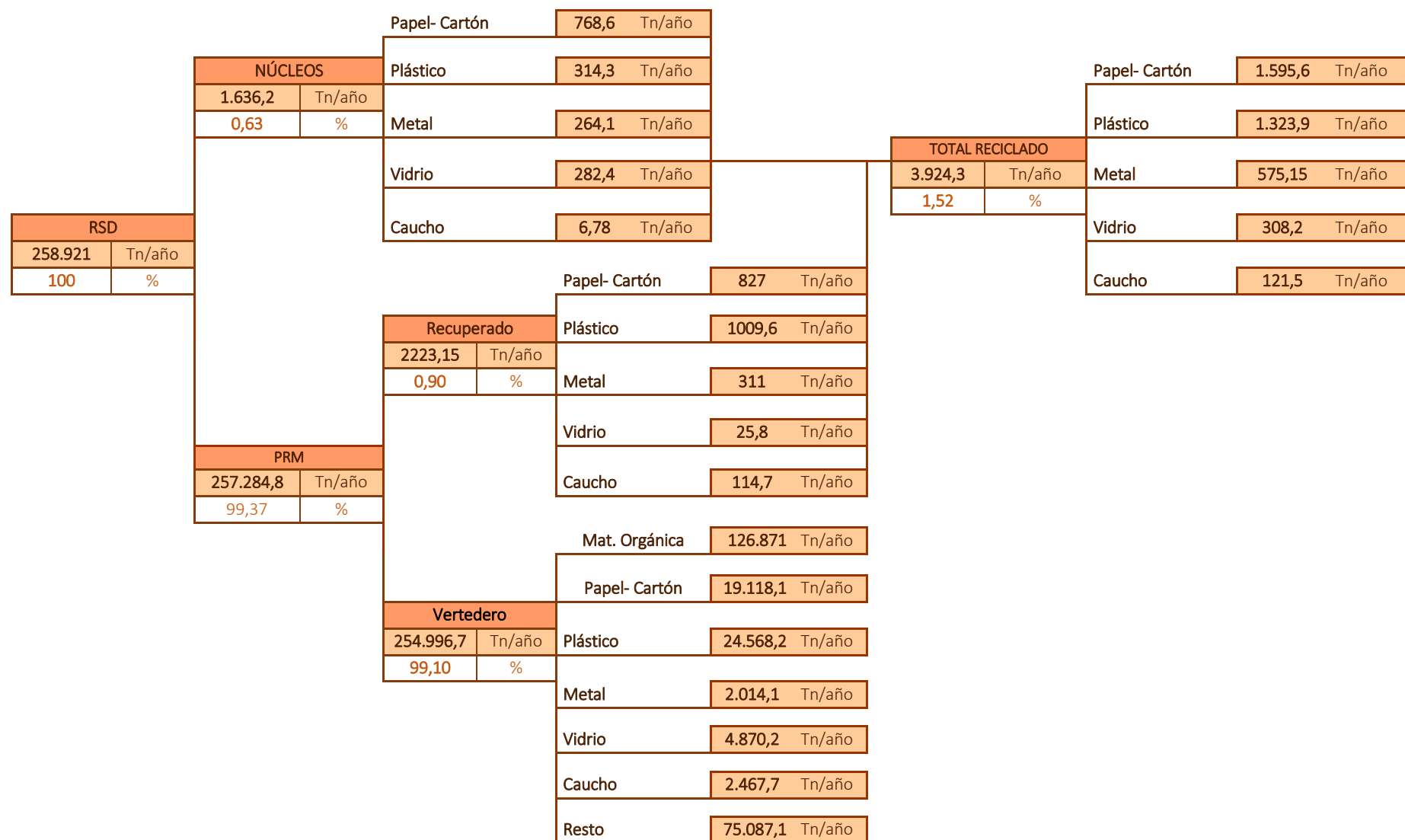


Figura 18. Flujograma del SGR de João Pessoa en 2018. Fuente: Propia.

## 6.3. EVALUACIÓN DEL SGR EN JOÃO PESSOA

En el presente punto se analiza la evolución del sistema de gestión de residuos implementado en João Pessoa, desde el año 2016 hasta el 2018, con la finalidad de obtener una imagen general de cuáles son los resultados y su eficiencia.

Una vez analizado el sistema de gestión se realiza una comparativa con los objetivos marcados en el Plano Municipal de Gestión integrada de Residuos Sólidos (PMGIRS) para 2031 y para 2034.

Los datos que se utilizan para realizar la caracterización del SGR de João Pessoa y la comparativa con los objetivos normativos son los recopilados en el apartado anterior.

### 6.3.1. CARACTERIZACIÓN DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS

En este apartado se muestra caracterización del sistema de gestión de João Pessoa, analizando su evolución del SGR los años 2016, 2017 y 2018.

#### 6.3.1.1. GENERACIÓN DE RESIDUOS

En la Figura 19 se observa el total de residuos generados en el municipio de João Pessoa desde 2016 hasta 2018.

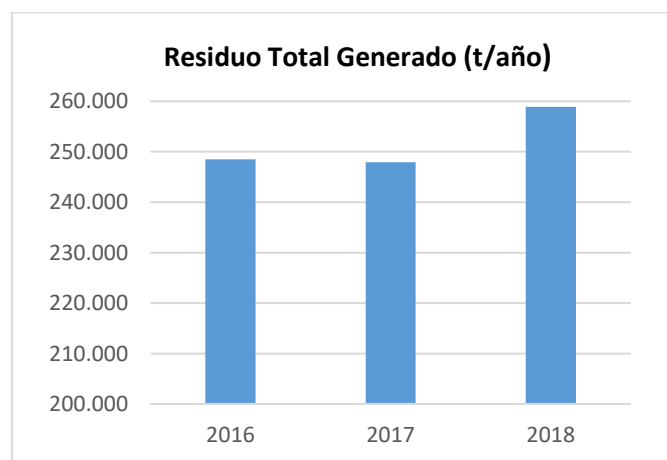


Figura 19. Cantidad de residuo total generado entre 2016 y 2018.

Fuente: Propia. Datos primarios del origen.

La cantidad de residuos sólidos generados, está directamente relacionada con el aumento poblacional, ya que si se aumenta la producción de alimentos y bienes de consumo para atender a la creciente demanda, se aumentan los residuos de esta.

Conociendo la evolución de la población del municipio durante el periodo de tiempo de 2016 a 2018 (Tabla 7), se ha calculado la generación de residuos por habitante al año, tal y como se ve en la Figura 20. La generación de residuos por habitante en João Pessoa es bastante estable, oscila entre 305 y 314 kg de diferencia.

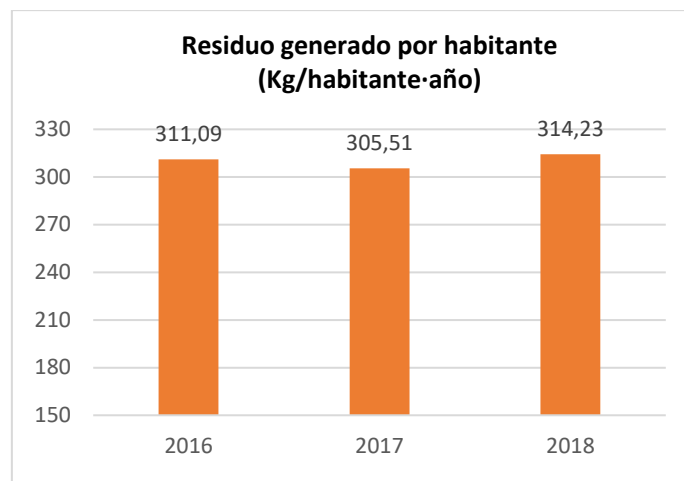


Figura 20. Cantidad de residuo generado por habitante anualmente.  
Fuente: Propia. Datos primarios del origen.

### 6.3.1.2. MATERIALES RECICLADOS Y DISPUESTOS EN VERTEDERO

En la Figura 21.a se detalla el porcentaje de material valorizado anualmente en función del total generado, entre los años 2016 y 2018. En el grafico está diferenciada la proporción de residuos que proviene de la recogida selectiva y el porcentaje que se separa en la PRM. A la derecha, la Figura 21.b indica la fracción de desechos que no se ha podido recuperar, y que finalmente se ha depositado en el vertedero.

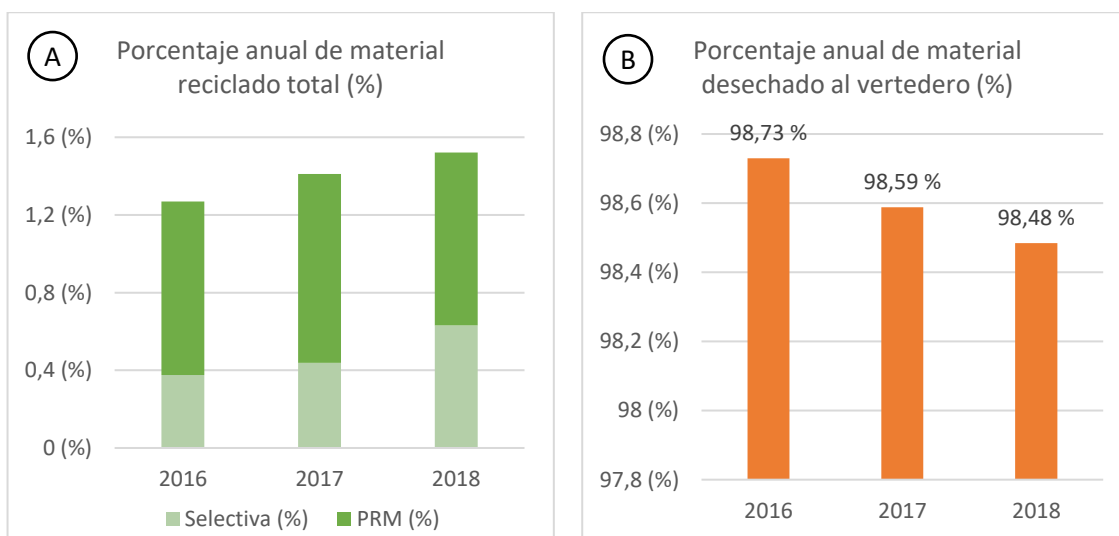


Figura 21. a) Porcentaje anual desechado al vertedero respecto al total de RSD generados y b) Porcentaje de material reciclado respecto al total de RSD generados. Fuente: Propia. Datos primarios de origen.

La tendencia de ambos gráficos es positiva, ya que se aumenta la fracción de materiales reciclables año tras año y por lo tanto los desechos que finalmente acaban en el vertedero disminuye. Esta es una buena tendencia, aunque no suficiente, tal y como se verá en apartados posteriores, para alcanzar las metas propuestas por la legislación.

La disminución de los residuos en los vertederos tiene consecuencias favorables para el medio ambiente, ya que la descomposición de los residuos junto con la materia orgánica generan

líquidos (lixiviado) y gases ácidos que potencian el impacto de compuestos tóxicos presentes en los envases plásticos, papeles, pilas, entre otros (de Campos Domingos et al., 2015).

También es importante reconocer como el porcentaje de material valorizable recogido de manera selectiva aumenta (ver figura 21.a), aun así los ratios de recuperación son muy bajos. Uno de los motivos por los que la recogida selectiva tiene unos porcentajes muy bajos es porque las rutas realizadas con camión solo recorren el 17,3% de la población, el resto de la recogida se realiza mediante carretas, lo que supone un trabajo muy costoso para los catadores y por lo tanto muy poco eficiente.

En cambio, la fracción de material potencialmente reciclable que se recupera de las Plantas de Recuperación de Materiales se mantiene prácticamente estable, el principal motivo es la falta de medios en la PRM. Los residuos llegan contaminados por la recogida convencional y con la escasa tecnología que hay en la planta (separación manual en las cintas transportadoras) resulta difícil recuperar los materiales valorizables. Por este motivo, la tasa de recuperación año tras año no varía demasiado, ya que los medios de la planta siguen siendo los mismos.

### 6.3.1.3. EVOLUCIÓN DE LA TASA DE RECICLAJE POR MATERIAL.

En este apartado se explica la evolución del reciclaje de cada uno de los materiales valorizables durante el periodo de 2016 a 2018. Los porcentajes de las tasas de reciclaje de cada material están calculados respecto a la cantidad total de cada uno de los materiales potencialmente valorizables en João Pessoa.

#### Papel y cartón

En este punto se analiza la tendencia de reciclaje del papel y del cartón entre los años 2016 y 2018. Como se observa en la Figura 22, el reciclaje de este material no sigue una evolución clara, en 2017 los resultados empeoran respecto a 2016, apreciándose un tímido aumento en 2018.

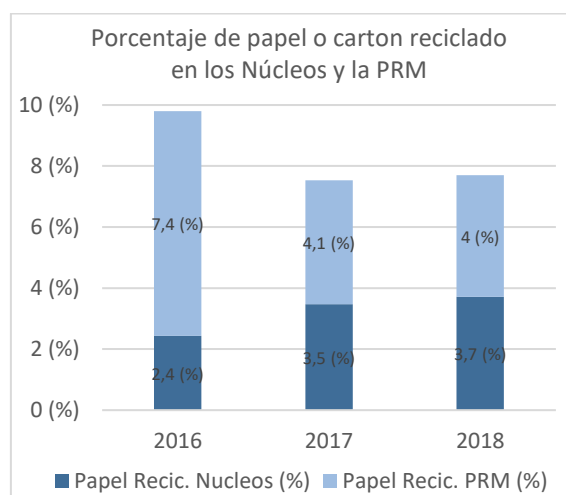


Figura 22. Porcentaje de papel o cartón reciclado entre 2016 y 2018  
. Fuente: Propia. Datos primarios del origen.

A continuación, se va a prestar atención al desglose de los porcentajes; el porcentaje de papel recopilado en la recogida selectiva (Núcleos) y el porcentaje separado en la PRM. El papel



separado en los Núcleos aumenta año tras año. Mientras que la recuperación de papel en la PRM disminuye. Esto sucede a causa de diversos factores; el primero de todos es la alta biodegradabilidad que presenta este material, por lo que lo hace difícilmente recuperable cuando se encuentra mezclado con materia orgánica, al recogerse mezclado.

Además, el aumento del reciclaje de otros materiales, se verá en los siguientes subapartados, como el plástico en 2017 (Ver Figura 23), el metal (Ver Figura 24) y el vidrio (Ver Figura 25) en 2018 actúa en detrimento reciclaje del papel y del cartón los dos últimos años del estudio.

### Plástico

En el caso del plástico, tal y como se muestra en el Figura 23, tampoco queda clara la tendencia de su reciclaje; en 2017 se obtienen un porcentaje de recuperación bastante bueno, pero en 2018 se empeora.

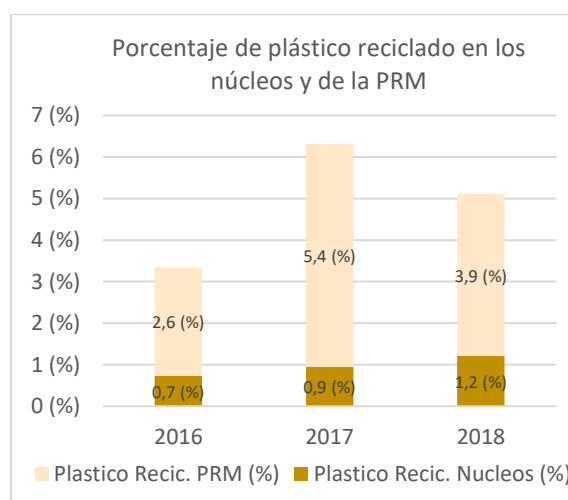


Figura 23. Porcentaje de plástico reciclado entre 2016 y 2018.

Fuente: Propia. Datos primarios del origen.

Estudiando el desglose de la recuperación del plástico, se observa como el porcentaje de plástico separado de forma selectiva y gestionado en los Núcleos aumenta ligeramente año tras año, pero en cambio la recuperación de este material en la PRM varía sin seguir una tendencia uniforme.

En 2018, se observa como su reciclaje total baja, esto es consecuencia de que en ese año la recuperación del metal alcanza resultados excelentes (Figura 24), por lo que la cantidad de reciclaje del plástico disminuye.

### Metal

Tal y como se observa en la Figura 24, los datos de recuperación del metal son muy buenos. Aumentan exponencialmente año tras año, alcanzando unos resultados muy satisfactorios en 2018.

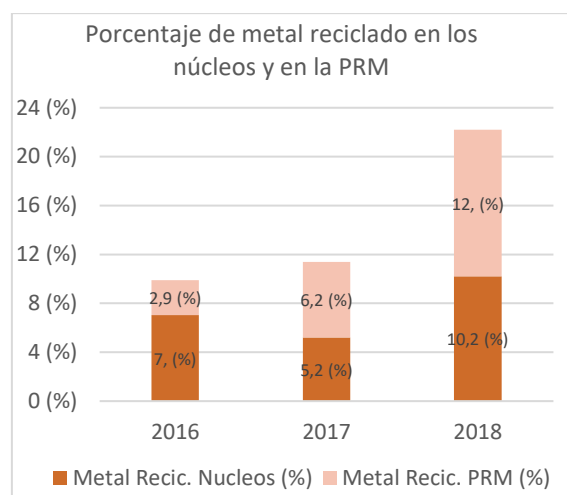


Figura 24. Porcentaje de metal reciclado entre 2016 y 2018.

Fuente: Propia. Datos primarios del origen.

El pico de recuperación destacado en el último año estudiado se observa tanto en los metales recogidos selectivamente y gestionados en los Núcleos, como en los recuperados en la PRM. Los buenos resultados acerca del reciclaje del metal se ven reflejados en el perjuicio del reciclaje del plástico (Ver Figura 23) y del papel (Ver figura 22), tal y como se ha comentado en los anteriores subapartados. Los catadores han priorizado el reciclaje del metal frente a los otros materiales, por las ganancias que obtienen.

## Vidrio

Como se observa en la Figura 25, la recuperación del vidrio en los años 2016 y 2017 es realmente escasa y además el resultado es menor en 2017. Aunque esta tendencia se revierte en 2018, en el que hay un repunte sustancial en el reciclado de este material.

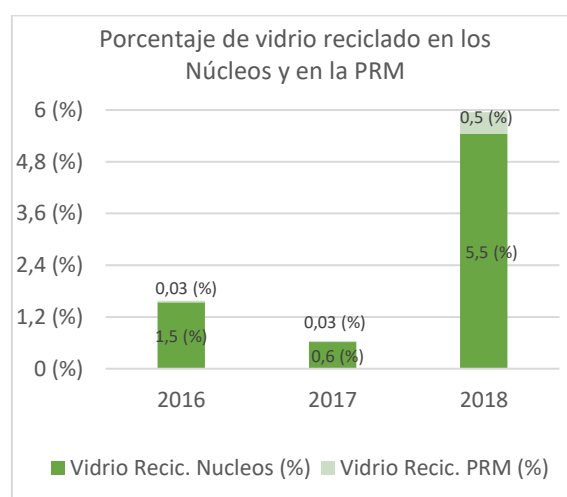


Figura 25. Porcentaje de vidrio reciclado entre 2016 y 2018.

Fuente: Propia. Datos primarios del origen.

Tal y como se aprecia en la Figura 26, prácticamente todo el vidrio reciclado proviene de forma selectiva y es separado en los núcleos. El repunte de recuperación del vidrio en 2018, es un motivo más en la bajada del papel y plástico en ese mismo año, como ya se viene comentando.

## Caucho

Como muestra la Figura 26, la tendencia de recuperación del caucho es bastante ascendente, con una ligera bajada en 2018.

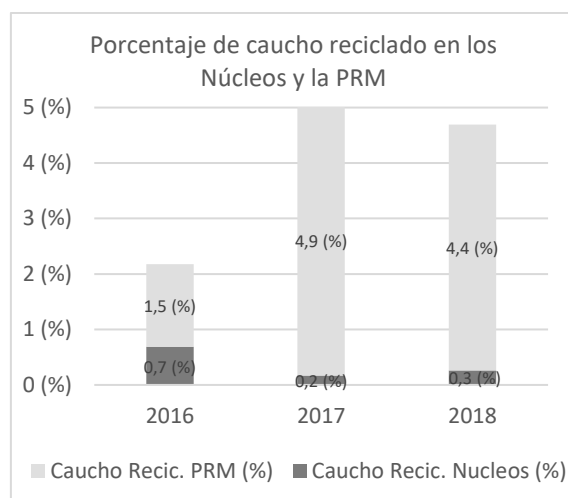


Figura 26. Porcentaje de vidrio reciclado entre 2016 y 2018.  
Fuente: Propia. Datos primarios del origen.

El pico de recuperación que se observa en 2017 afecta a la recuperación del papel (Ver Figura 22) y del vidrio (Ver Figura 25) en ese año, en los cuales se observa un valle.

Otro dato curioso que se observa, es como ocurre justamente el caso contrario del vidrio, prácticamente todo el caucho recuperado se realiza en la planta de recuperación de materiales. La recogida selectiva de caucho es prácticamente nula. Eso puede ser debido a que la mayoría del caucho que se separa proviene de chancas de playa, y ese es un elemento fácil de detectar y diferenciar en la cinta transportadora.

## 6.4. COMPARATIVA DEL COMPORTAMIENTO DEL SGR CON RESPECTO A LAS METAS NORMATIVAS

### 6.4.1. METAS Y PLAZOS PARA LA REDUCCIÓN DE LOS RESIDUOS SECOS DISPUESTOS EN EL VERTEDERO

En este apartado, en la Figura 27, se muestra mediante un diagrama de barras los resultados de reciclaje de João Pessoa durante los años 2016, 2017 y 2018. Este porcentaje está calculado en función del material potencialmente valorizable de la ciudad para cada uno de estos años. Con estos datos se ha trazado una línea de tendencia que indicando la previsión de reciclaje en João Pessoa si sigue a ese ritmo de crecimiento.

Esta previsión del reciclaje es comparada con las metas de recuperación de residuos secos establecidas en el Plan Municipal de Gestión Integral de Residuos de João Pessoa (Ver Apartado 4.3.2.1), para los años 2019 (9%), 2023 (13%), 2027 (19%) y 2031 (25%).

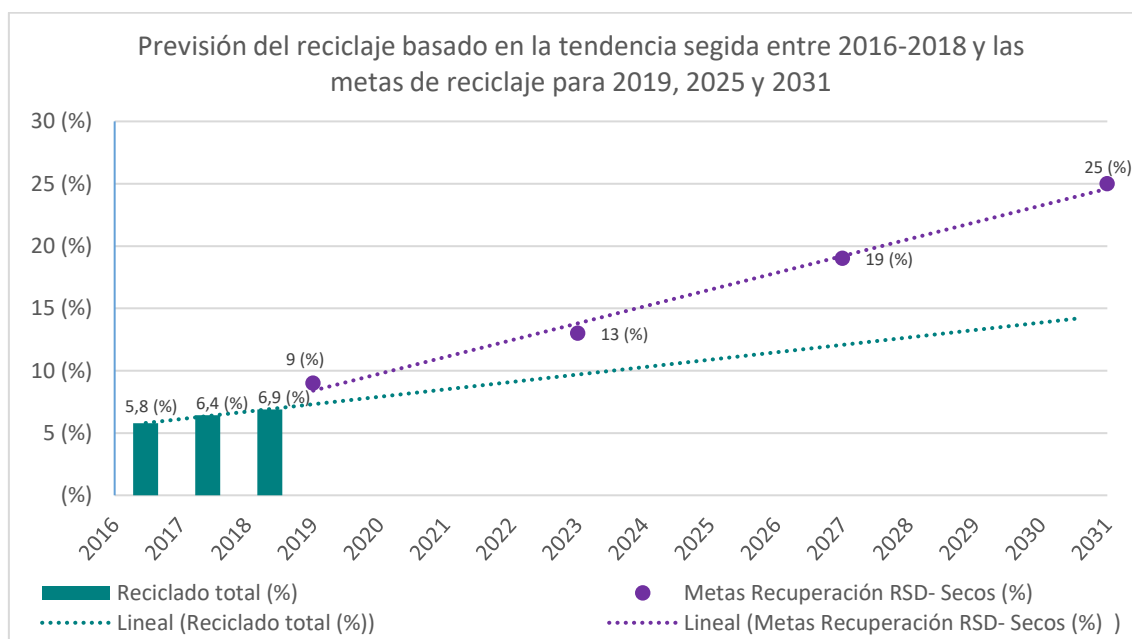


Figura 27. Comparativa entre el porcentaje de residuos secos recuperados en función de la cantidad de materiales potencialmente valorizables entre 2016 y 2018 y las metas de reciclaje des de 2019 a 2031. Fuente: Propia.

Tal y como se ve en el gráfico, la tendencia actual de crecimiento de la tasa de reciclaje en João Pessoa aumenta muy lentamente e impide alcanzar los estándares establecidos por la ley, llegando a una diferencia negativa de más de un 10% en 2031.

Si se comparan las metas del plan con los porcentajes recuperados de cada material, los resultados no mejoran. En el caso del papel (Ver Figura 22) en 2016 el porcentaje de recuperación de este material estaba por encima de los objetivos de reciclaje ara el 2019. En cambio, en 2017 y 2018 los resultados empeoran. A pesar de este descenso, los resultados de 2017 y 2018 no son malos ya que se está muy cerca de ratios de recuperación establecidos en la legislación para 2019.

En el caso del plástico (Ver Figura 23) los resultados de reciclaje están aún muy lejos de los ratios de los objetivos de reciclaje. Por contra, tal y como se observa en el caso del metal (Ver Figura 24) los datos de recuperación de este material son muy buenos, llegando casi a alcanzar la meta propuesta para el 2031 en el año 2018.

Los datos de la recuperación del vidrio (Ver Figura 25) la recuperación del vidrio en los años 2016 y 2017 es realmente escasa y está lejos de cumplir con las metas establecidas en la ley, esta tendencia se revierte en 2018, pero sigue sin acercarse a estos objetivos. Por último, en el caso del caucho (Ver Figura 26), aunque la tasa de recuperación aumenta los dos últimos años, los resultados siguen estando lejos de las metas establecidas en el plan.

### 6.4.2. METAS Y PLAZOS PARA LA REDUCCIÓN DE LOS RESIDUOS HÚMEDOS DISPUESTOS EN EL VERTEDERO

En este apartado se muestra como no se ha recuperado ningún residuo húmedo en João Pessoa durante los años 2016, 2017 y 2018, por lo que no hay tampoco ninguna línea de tendencia que indica la previsión de recuperación de dichos residuos (Ver Figura 28).

En el grafico aparecen las metas de recuperación de residuos húmedos establecidas en el Plan Municipal de Gestión Integral de Residuos de João Pessoa (Ver Apartado 4.3.2.1), para los años 2019 (10%), 2023 (20%), 2027 (30%), 2031 (40%) y 2034 (50%).

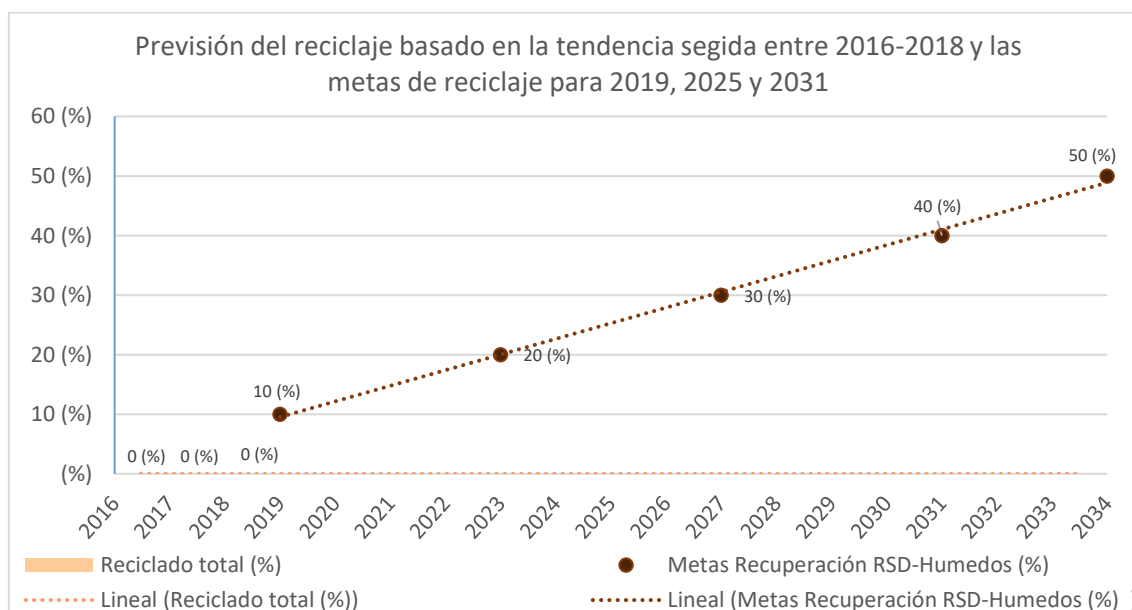


Figura 28. Comparativa entre el porcentaje de residuos húmedos recuperados en función de la cantidad de materia orgánica entre 2016 y 2018 y las metas de reciclaje des de 2019 a 2034. Fuente: Propia.

### 6.4.3. CONCLUSIÓN: JUSTIFICACIÓN DE LA NECESIDAD DE MEJORA

Después de la comparativa del comportamiento del SGR de Joao Pessoa con respecto a las metas establecidas en el PMGIRS, se evidencian unas malas tendencias y resultados. La recuperación de residuos secos está lejos de cumplir con dichas metas y sus avances son poco prometedores. Y en el caso de la recuperación de residuos húmedos es totalmente nula.

Debido a estos malos resultados de recuperación de los materiales reciclables, así como la inexistencia del reaprovechamiento de la materia orgánica, se hace necesario identificar los aspectos que se pueden mejorar en el sistema de gestión. Con la finalidad de conseguir cumplir con las metas y plazos establecidos en el Plan Municipal de Gestión de Residuos de João Pessoa.

Para ello, será interesante compararlo con otros sistemas de gestión implementados en otras ciudades de Brasil donde las ratios de recuperación sean superiores. Con el fin de realizar una propuesta de mejoras para conseguir los objetivos de reciclaje propuestos por la legislación en 2031 y 2034.

El escenario en el cual se propondrán todas las mejoras y al cual se le denominará Escenario BASE o Escenario 0, se trata de la imagen del Sistema de Gestión de Residuos para el año 2018. En la Figura 29 se muestra su flujograma simplificado de este escenario.

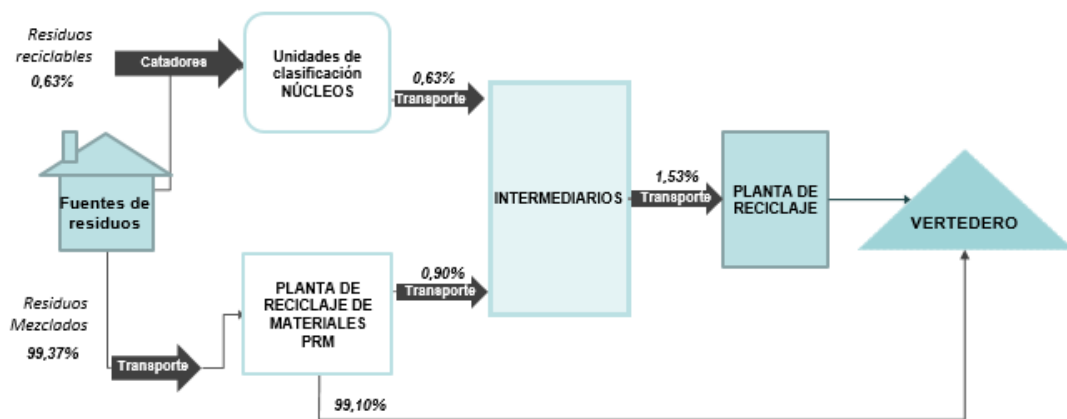


Figura 29 Flujograma del Escenario BASE. Fuente: Propia

## 7. BLOQUE II: IDENTIFICACIÓN DE ASPECTOS DE MEJORA Y PROPUESTAS DE ESCENARIOS ALTERNATIVOS

En este apartado se realiza una propuesta de escenarios alternativos basados en la introducción de mejoras en el SGR actualmente aplicado en João Pessoa. Para ello, el primer paso llevado a cabo ha sido la identificación de los datos de recogida, composición gravimétrica y reciclaje de los SGR de las diferentes capitales de estado de Brasil (Ver Figura 30). Con ello, se desea identificar qué sistemas ofrecen mejores Índices de Recuperación de Residuos Reciclables (%RRR) en el país, así como, cuáles son las tecnologías que se aplican.

Por lo tanto, una vez seleccionadas y estudiados los SGR de las ciudades con mejores tasas de reciclabilidad de Brasil, se realiza un estudio exhaustivo de los métodos y técnicas aplicadas en dichos sistemas con el fin de identificar mejoras, técnicamente viables, que se puedan aplicar a João Pessoa con la finalidad de proponer escenarios alternativos a partir de su implementación.



Figura 30. Estados y Capitales de Brasil. Fuente: (Bezerra, 2018)

## 7.1. IDENTIFICACIÓN DE LAS CAPITALES BRASILEÑAS CON MEJORES ÍNDICES DE RECUPERACIÓN DE RESIDUOS RECICLABLES

En la Tabla 8 se exponen los datos del SGR de todas las capitales de los estados Brasileños. La primera columna indica la cantidad de residuos recogidos en el año 2016, la segunda el total de los residuos potencialmente reciclables en cada ciudad y, finalmente, la tercera el total de residuos que se recuperan en la ciudad.

Para la obtención de los datos has sido utilizado el Banco de Datos del *Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento* (SNIS, 2018), es una base de datos creada en 1996 sobre las operaciones, la gestión, las finanzas y la calidad de los servicios de agua, alcantarillado y eliminación de residuos sólidos en los municipios brasileños.

A partir de los valores de los residuos potencialmente reciclables y el total de residuos recuperados, se calcula el Índice de Recuperación de los Residuos Reciclables (%RRR) para cada capital Brasileña. Este parámetro representa el porcentaje de material reciclado en función de los potencialmente valorizables.

En la Tabla 8 aparecen señaladas la ciudad de João Pessoa en color naranja y las ciudades con mejores tasas de reciclabilidad que João Pessoa en verde.

Municipio	Residuos Sólidos Domiciliares (Tn)	Residuos potencialmente reciclables (Tn)	Residuo recuperado total (Tn)	%RRR
Aracaju	220.540,00	70.352,26	1.543,00	2,19
Fortaleza	1.636.300,70	590.050,03	8.490,70	1,44
João Pessoa	248.521,00	51.344,44	3.156,26	6,14
Maceió	423.408,30	200.610,85	1.455,70	0,73
Natal	313.198,50	79.865,62	2.486,70	3,11
Recife	817.375,70	260.742,85	2.028,80	0,78
Salvador	892.034,00	284.558,85	2.000,00	0,70
São Luís	284.963,80	90.903,45	1.320,00	1,45
Teresina	817.375,70	260.742,85	286,60	0,11
Belém	348.828,50	108.450,78	1.021,10	0,94
Boa Vista	-	-	0,00	0,00
Macapá	-	-	4.200,00	0,00
Manaus	580.240,40	180.396,74	7.207,90	4,00
Palmas		-	1.042,80	
Porto Velho	100.880,00	31.363,59	800,00	2,55
Rio Branco	71.337,30	22.178,77	78,10	0,35
Cuiabá	181.777,40	61.947,44	2.114,90	0,03
Campo Grande	272.729,50	-	-	-
Goiânia	475.620,40	95.124,08	20.815,60	21,88
Brasília	868.121,90	229.097,37	27.481,30	12,00
Belo Horizonte	1.307.800,00	5.697,20	410.649,20	1,39



Rio de Janeiro	3.711.442,90	29.144,90	1.500.536,36	1,94
São Paulo	1.972.995,00	1.721,00	722.116,17	0,24
Vitória	121.550,00	1.106,90	53.700,79	2,06
Curitiba	514.748,00	252.689,79	4.675,00	1,85
Florianópolis	199.918,70	85.965,69	10.160,30	11,81
Porto Alegre	399.045,40	127.295,48	13.713,00	10,77

*Tabla 8. Índices de recuperación de materiales en el sistema de gestión de residuos de las ciudades del Nord-Oeste de Brasil. Fuente: Sistema Nacional de Informação sobre saneamiento (SNIS, 2018)*

Las capitales con mejores índices de reciclabilidad que João Pessoa son:

- Goiânia
- Brasília
- Florianópolis
- Porto Alegre

Analizando los datos de Goiânia para el año 2016, el balance del flujo de los residuos domiciliarios ofreció una eficiencia de reciclaje del 21,88 % (SNIS, 2018). En cuanto al porcentaje de materiales valorizados en relación al total de residuos generados es del 4,38 %.

En Brasília la eficiencia de reciclaje es del 12% (SNIS, 2016) y el porcentaje de materiales valorizados en relación al total de residuos generados es del 3,17 %.

La eficiencia de valorización en Florianópolis es del 12,5 % (SNIS, 2016). En cuanto al porcentaje de materiales valorizados en relación al total de residuos recogidos es del 5,4 %.

Por último, analizando los datos de Porto Alegre, el balance del flujo de los residuos domiciliarios muestra una eficiencia de reciclaje del 10,77 % (SNIS, 2016). En cuanto al porcentaje de materiales valorizados en relación al total de residuos generados es del 3,44 %.

## 7.2. DESCRIPCIÓN DE LA GESTIÓN DE RESIDUOS EN BRASILIA, GOIÂNIA, FLORIANÓPOLIS y PORTO ALEGRE

En este apartado se definen los SGR aplicados en las cuatro capitales brasileñas identificadas como las que presentan los mejores Índices de Recuperación de Residuos Reciclables según Tabla 8.

Para identificar los procesos llevados a cabo para la gestión de los residuos en cada una de las ciudades, han sido revisados los siguientes Planes Municipales de Residuos e informes gubernamentales relativos a los SGR en cada ciudad:

- Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Goiânia.
  - Plano Distrital De Gestão Integrada De Resíduos Sólidos (PDGRIS). Governo de Brasília.
  - Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos – PGRS da Município de Florianópolis.
  - Plano Municipal de Coleta Seletiva. Prefeitura Municipal de Florianópolis, 2016.
- Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. Prefeitura Municipal de Porto Alegre.

### 7.2.1. SGR DE GOIÂNIA

Goiânia es la capital y ciudad más grande del estado brasileño de Goiás, con una población de 1.302.001 (IBGE, 2010) es la segunda ciudad más grande de la Región Centro-Oeste y la 11ª más grande del país.

En 2016 se estimó una recogida total de 475.600 toneladas (SNIS, 2016) de residuos sólidos gestionados por COMURG, esta es la empresa encargada de ejecutar los servicios de limpieza urbana. En la Figura 31, se muestra el camino que sigue la materia (RSD) en el sistema de gestión de esta ciudad. En los apartados posteriores se detallan cada una de las etapas del SGR.

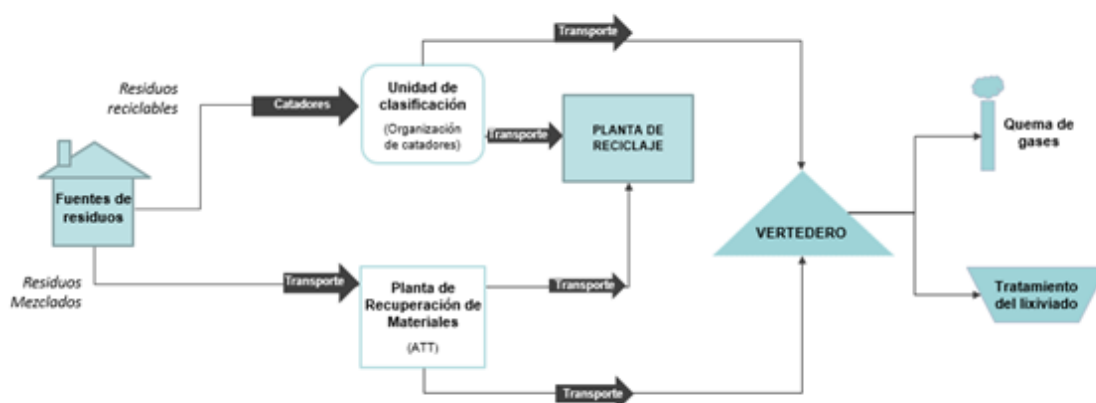


Figura 31. Flujograma del sistema de residuos domiciliarios de Goiânia. Fuente: Propia.

## Recogida y transporte

La tasa de cobertura de recogida de RSD en la zona urbana de Goiânia es del 100%, toda la recogida de residuos se realiza puerta a puerta, tanto la recogida selectiva como la convencional.

El municipio inició la recogida de los residuos reciclables a través del Programa Goiânia Recogida Selectiva (PGCS) creado en 2008, con el objetivo de evitar que materiales reciclables fueran al vertedero, pudiendo así aumentar la vida útil de éste, y al mismo tiempo, beneficiar a familias en cooperativas de catadores.

Actualmente la ciudad contempla la recogida selectiva de los materiales reciclables a través del sistema puerta a puerta en 545 barrios muy similar a la recogida convencional. Para participar en el Programa de Recogida Selectiva la población debe hacer la separación de los residuos reciclables (papel, plástico, metal y vidrio), almacenarlos limpios y secos en bolsas de plástico o cajas de cartón y lo dejarlos en la puerta de su casa o en los PEV's esparcidos por la ciudad (Ver Figura 32), para que el camión de la COMURG los recoja y los lleve hasta las cooperativas de catadores (PMGIRS Gioania, 2016).

Para el sistema el transporte de los materiales reciclables recogidos tanto puerta a puerta como en los 129 PEVs esparcidos por la ciudad se utiliza una flota de camiones basculantes que transportan los residuos a las asociaciones de catadores. Esta frecuencia de recogida del RSD representa el 40% en viajes diarios y el 60% en trisemanales.

Para la recogida convencional se utilizan camiones compactadores. Una vez recogidos los residuos sin separar, los camiones los transportan y los descargan en el área de transbordo y triaje (ATT). Esta área sirve como un depósito temporal de los residuos, con el fin de promover una mayor eficiencia en la logística de recogida y transporte de los residuos sólidos hasta su destino final del vertedero, ya que se sitúa cerca del centro urbano.



Figura 32. Punto de entrega voluntaria. Fuente: (PMGIRS Goiânia, 2016)

## Tratamiento de la recogida selectiva

A continuación los materiales procedentes de la recogida selectiva son clasificados, para posteriormente comerciarse, en las centrales de clasificación por medio de 15 asociaciones y cooperativas, contribuyendo con el sustento de varias familias. Allí el material se separa de forma más detallada, para después ser prensado y almacenado para su venta.

## Tratamiento de la recogida convencional

Las cooperativas y asociaciones que forman parte del Programa de Recogida Selectiva también se encargan de recuperar los materiales reciclables de la recogida convencional. La basura será transportada a la planta donde se deposita sobre la cinta transportadora.

A continuación los trabajadores realizan la selección manual de los productos reciclables (cartón, papel, plástico película, plásticos duro, metales, latas, vidrios, maderas, paños, etc.). Los materiales seleccionados se prensan, se empaquetan y se almacenan para su comercialización.

Los desechos que no se pueden recuperar se dirigen al vertedero de Goiânia con un vehículo de transferencia de capacidad entre 40 m<sup>3</sup> y 60 m<sup>3</sup>.

## Valorización

Los residuos reciclables recuperados por las centrales de clasificación se venden a las empresas recicladoras, de esta forma se sustentan las asociaciones y cooperativas encargadas del sistema de reciclaje en Goiânia.

## Disposición final

Las actividades que tienen lugar en el vertedero de Goiânia son las siguientes: la disposición final de los residuos desechados, la captación y tratamiento del estiércol y la captación y quema del biogás.

El método utilizado para el funcionamiento del vertedero de Goiânia consiste en la formación de capas de residuos compactados, con la finalidad de que ocupen el menor volumen posible, al final de cada jornada de trabajo serán cubiertos con capas de tierra.

Para el tratamiento del estiércol, el terraplén posee dos lagunas anaeróbicas y una laguna facultativa, donde el líquido es llevado por drenajes horizontales tipo "Espina de Pez" a las lagunas, las cuales funcionan como tanques sépticos abiertos, ya que por falta de mantenimiento fueron desactivadas, convirtiéndose en lagunas para el depósito de estiércol (Ver Figura 33).



*Figura 33. Laguna para el tratamiento del estiércol.  
Fuente: (PMGIRS Goiânia, 2016).*

Para el tratamiento de los gases existe el drenaje vertical, que consiste en captar los gases por tuberías y los direccionan a la atmósfera, evitando que esos gases infiltren en el subsuelo y alcancen redes de alcantarillado, fosas y pozos. Todo el biogás producido es quemado, de esta forma se mitigan los efectos de los gases de vertedero en la atmósfera. Ya que el metano liberado en el vertedero es 21 veces más contaminante y perjudicial para el efecto invernadero que el dióxido de carbono que se produce al quemar el biogás.

## 7.2.2.SGR DE BRASILIA

Brasilia es la capital de Brasil y la sede del gobierno del Distrito Federal. La ciudad está ubicada en la región centro-occidental del país y según el último censo del IBGE en 2010 había 2.570.160 personas residiendo en ella.

En 2016, los habitantes de la capital produjeron un total de aproximadamente 868.000 toneladas (SNIS, 2016) de RSD, los cuales se gestionan en base al Plan Distrital de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Brasilia (PDGRIS Brasilia, 2018). En la Figura 34, se muestra el flujograma con las etapas del SGR, las cuales se explican en detalle en los siguientes apartados.

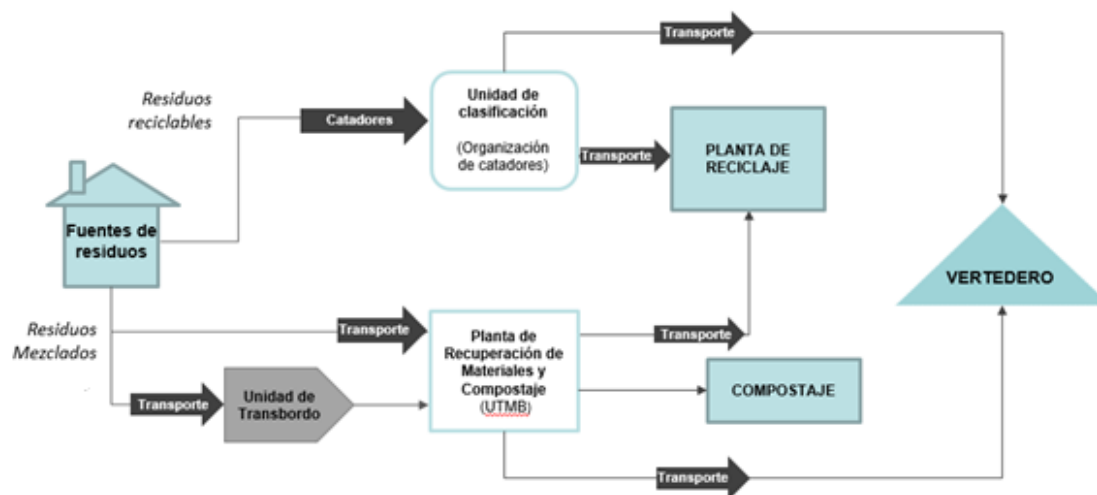


Figura 34. Flujograma del sistema de residuos domiciliarios de Brasilia. Fuente: Propia.

### Recogida y transporte

Actualmente la capital Brasileña dispone de tres servicios de recogida de RSD. Por una parte, la recogida convencional, en la cual los RSD son recogidos sin separación previa en origen, los materiales reciclables se encuentran mezclados con la materia orgánica y los desechos no reaprovechables. Este servicio es ejecutado por la empresa terciaria encargada del Servicio de Limpieza Urbana (SLU).

Por otra parte, el sistema diferencia entre lo que el PDGRIS Brasilia (2018) denomina como la Recogida Selectiva (90%) y la Recogida Selectiva Inclusiva (10%). En ambos sistemas los residuos están diferenciados entre papel, cartón, plástico o metal, sin mezclar con la basura común. La diferencia entre estas dos modalidades es quien tiene la competencia del servicio; la Recogida Selectiva está realizada por el SLU, y la Recogida Selectiva Inclusiva por las organizaciones de catadores.

Todos los tipos de recogida se realizan con el modelo puerta a puerta, pero para la recogida convencional también se utiliza el modelo punto a punto, donde los habitantes de Brasilia llevan los residuos a los contenedores semienterrados de 5 m<sup>3</sup>, para atender así áreas de difícil acceso.

Además, los habitantes de Brasilia pueden llevar estos residuos reciclables a Puntos de Entrega Voluntaria (PEV), los cuales son locales preparados para recibir diariamente hasta 1 metro cúbico por persona de residuos de la construcción civil, voluminosos (como muebles) y restos de podas,

materiales reciclables como papeles, plásticos, cartones y metales, siempre y cuando estén separados y limpios.

Los vehículos pasan por los establecimientos residenciales en frecuencia diaria o alternada. El transporte de residuos de recogida convencional y la recogida selectiva se realiza con camiones compactadores, mientras que el transporte de la recogida selectiva inclusiva con camiones con remolque.

Los residuos **procedentes de la recogida selectiva y recogida selectiva inclusiva (1,45 %)** llevan los residuos a las asociaciones o cooperativas de catadores para su reciclaje y valorización. Los residuos de la recogida convencional son direccionados a una de las Unidades de Tratamiento Mecánico Biológico (UTMBs), pasando, preliminarmente, por las unidades de transbordo (PDGRIS Brasília, 2018).

### *Tratamiento de la recogida selectiva*

Una vez se han transportado los materiales potencialmente reciclables a las asociaciones de catadores, se realizan los trabajos de selección, clasificación y almacenamiento para su posterior comercialización.

Inicialmente, los residuos son depositados sobre las cintas transportadoras, donde los catadores separan manualmente los materiales valorizables depositándolos en bolsas o cajas según su tipología (Ver Figura 35).



*Figura 35. Actividades realizadas en la planta de tratamiento de la recogida selectiva.*

*Fuente: (Serviço de Limpeza Urbana, 201).*

Al finalizar el tratamiento de los residuos, los materiales separados son prensados y empacados para su venta a empresas recicladoras, el resto es dirigido al vertedero de la capital.

### **Tratamiento de la recogida convencional**

En las Unidades de Tratamiento Mecánico-Biológico (UTMB) se gestionan los residuos procedentes de la recogida convencional. Estas unidades tienen como objetivo separar los residuos mixtos procedentes de la recogida convencional, separando la fracción orgánica de forma mecánica, para el posterior tratamiento por compostaje, y la recuperación de los residuos secos, realizada de forma manual por los catadores.

Brasilia cuenta con dos Unidades de Tratamiento Mecánico-Biológico (UTMB), la Unidad de la Ala Sur y Unidad de Ceilândia. Cada planta posee especificaciones técnicas y operacionales en cuanto al procesamiento del residuo mixto diferentes.

En la Figura 36 se puede observar un esquema simplificado con cada etapa del proceso que se produce en la UTMB del Ala sur, el cual se describe a continuación.

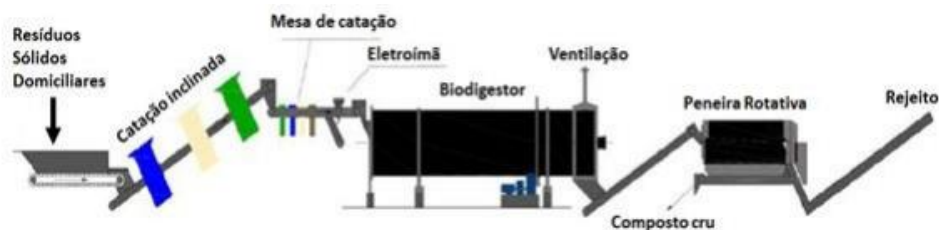


Figura 36. Proceso de la UTMB del Ala Sur. Fuente: (Lemos da Silva et al., 2018).

El lugar de recepción de residuos es una nave cerrada (Ver Figura 37.a) donde estos se desplazan mediante cintas transportadoras inclinadas con tres catadores en cada una de ellas, los cuales separan los residuos reciclables de forma manual (Ver Figura 37.b).



Figura 37. a) Recepción de los residuos convencionales y b) Recogida de los materiales reciclables en la UMTB. Fuente: (Lemos da Silva et al., 2018).

La cinta sigue hasta una sala cerrada, en la que hay otros 4 catadores separando el material (Figura 38), pasando seguidamente por un electroimán que separa la fracción metálica. Después de haber retirado los metales residuo se dirige al biodigestor, aunque en la actualidad, el biodigestor sólo cumple la función de otro lugar de paso, pues la planta trabaja en flujo continuo, no hay período en que el biodigestor quede cerrado para digestión del material (Lemos da Silva et al., 2018).



Figura 38. Recogida de los materiales reciclables en la UMTB. Fuente: (Lemos da Silva et al., 2018).

El residuo entonces pasa por el tamiz rotativo en que se separan los materiales de mayor tamaño que siguen como desechos y los de tamaño inferior que son almacenados en galpón cerrado para



su posterior compostaje. El rechazo sigue hacia el vertedero de Brasilia (Lemos da Silva et al., 2018).

La UTMB de Ceilândia sigue el siguiente proceso que se describe a continuación. En la Figura 39 hay un esquema simplificado del sistema de clasificación de la planta.

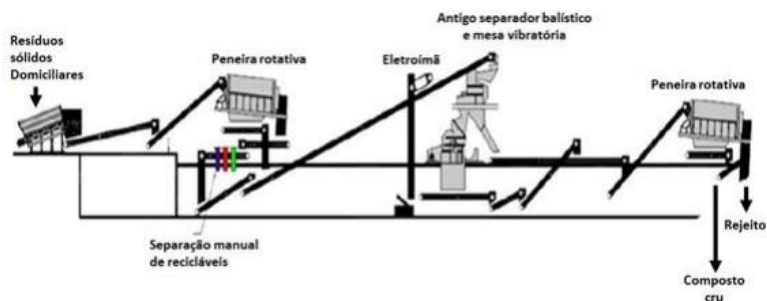


Figura 39. Proceso de la UTMB de Ceilândia. Fuente: (Lemos da Silva et al., 2018).

Inicialmente, el residuo que llega es pesado en la balanza, y recibido en la planta. Se desprende en las cintas transportadoras donde se abren las bolsas que los contienen, dirigiendo el flujo de residuos hasta la primera criba. Este tamiz rotativo tiene la función sólo de dividir los residuos en las transportadoras donde los catadores clasifican los residuos reciclables, enviándolos en bolsas a un galpón externo en el que se almacenan y se prensan hasta que se comercializan (Ver Figura 40).



Figura 40. Nave de almacenamiento de los materiales separados y enfardados. Fuente: (Lemos da Silva., 2018).

El flujo de material desechado es dirigido al electroimán, donde se extraen los metales ferrosos. A continuación, la mesa vibratoria y el separador balístico tienen la función de regular la velocidad de las cintas cuando hay variación de volumen de residuo de una cinta a otra. El último tamiz rotativo tiene la función de separar el residuo que seguirá el proceso de compostaje, y el material que tenga diámetro mayor, será destinado al vertedero de Brasilia (Lemos da Silva et al., 2018).

Todo el material que fue seleccionado como para producción de compuesto es madurado en pilas en la UTMB de Ceilândia, ya que posee espacio suficiente para el acondicionamiento en los patios que quedan en el área externa. De deposita dejándolo madurar 90 días, entonces se llevan muestras a laboratorios donde se verifican parámetros de calidad. Una vez aprobada su calidad, es tamizado y donado para pequeños agricultores. En la Figura 41 se puede observar uno de los patios de compostaje.





*Figura 41. Pilas de compostaje en la UMTB de Ceilândia.*

*Fuente: (Lemos da Silva, 2018).*

La eficiencia de procesamiento del conjunto de las dos UTMB es de aproximadamente el 25% del total de los residuos recogidos en el Distrito Federal. De ese total procesado, el **18,29% fue convertido en compost** y el **4,2% se valorizaron** (PDGRIS Brasília, 2018).

### Valorización

Los residuos valorizables provenientes de la recogida selectiva y recogida convencional son llevados a las plantas de reciclaje para transformarlos en materias primas o nuevos productos. Con la comercialización de estos, los catadores sacan su sustento económico.

### Disposición final

Actualmente, la disposición final de residuos y desechos se realiza en el vertedero. Además de en los lugares destacados, un número importante de catadores actúa en el área del vertedero, con actividades de tamizaje ejecutadas directamente sobre masa de residuos depositados para la posterior venta de los residuos valorizables. Las condiciones de trabajo de estos son completamente inapropiadas para su seguridad y salud (Ver Figura 42).



*Figura 42. Catadores recogiendo desechos en el vertedero.*

*Fuente: (PDGRIS Brasília, 2018).*

### 7.2.3.SGR DE FLORIANÓPOLIS

Florianópolis es la capital y la segunda ciudad más grande del estado de Santa Catarina, en la región sur de Brasil. La ciudad tiene una población de 421.240, según el último censo del IBGE para 2016, es la segunda ciudad más poblada del estado y la 47 en Brasil.

En 2016 se estimó una **recogida** total de RSD de unas 189.600 toneladas (SNIS, 2016) los cuales están gestionados por la Companhia Melhoramentos da Capital (COMCAP) de acuerdo a las indicaciones del Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos – PGRS da Município de Florianópolis (COMCAP, 2011).

En la Figura 44, se muestra el flujograma con cada una de las etapas que siguen los RSD en su gestión. En los apartados posteriores se explica con detalle su tratamiento.

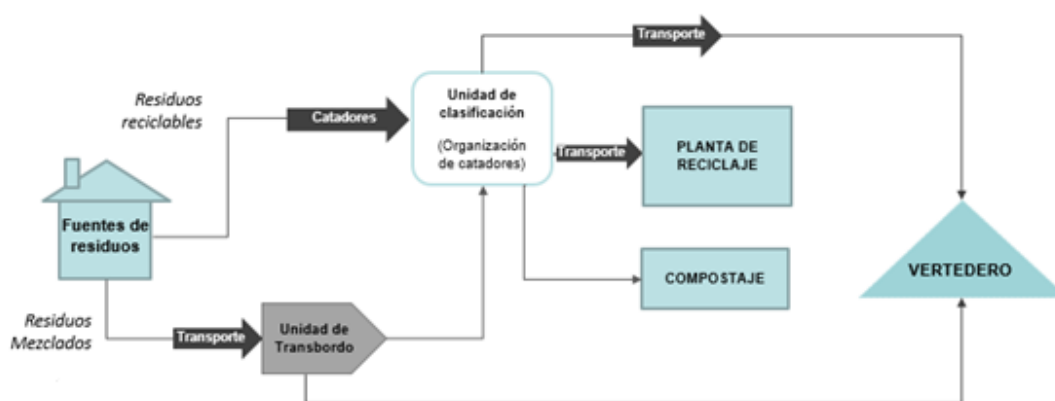


Figura 43. Flujograma del sistema de residuos domiciliarios de Florianópolis. Fuente: Propia.

#### Recogida y transporte

El sistema de gestión se clasifica por dos tipos de sistemas: la recogida convencional y la recogida selectiva. En la recogida convencional se recoge la basura proveniente de las residencias, se compone de materiales orgánicos y de inorgánicos que están mezclados, es decir, no pasan por una selección previa, es el sistema predominante en la ciudad.

La recogida convencional es ejecutada directamente por la COMCAP, en el 98% del municipio de Florianópolis. En las calles de fácil acceso, atiende el 100% de la población con recogida puerta a puerta, siendo que el otro 2% es atendido por medio de basureros comunitarios, debido al hecho de que esa parte de la población vive en lugares de difícil acceso a los caminos de recogida. En este método es la población que se encarga de llevar la basura hasta la basura comunitaria (Ver Figura 44.a y 44.b) más cercana, de forma que los empleados de la **recogida** tengan acceso al material (COMCAP, 2011).



Figura 44. Recogida selectiva puerta a puerta: a) Contenedores en la puerta de un edificio residencial y b) catadores recogiendo los contenedores de recogida selectiva. Fuente: (COMCAP, 2011).

Para la **recogida** convencional, el servicio de limpieza cuenta con camiones compactadores. En 2003 la ley municipal hizo obligatorio el uso de contenedores para recogida mecanizada de los residuos (Ver Figura 45). En ese sistema, los camiones están equipados con elevadores mecánicos que recogen los contenedores adaptados a ese modelo. Este modelo pretende humanizar el trabajo de los trabajadores, ya que elimina la exposición directa de los trabajadores a los residuos, así como al reducir el esfuerzo físico necesario para recoger la basura y colocarlo en el camión (COMCAP, 2011).



Figura 45. Camión de recogida mecanizado. Fuente: (COMCAP, 2011).

En cuanto a la **recogida** selectiva, es hecha por el sistema puerta a puerta y por medio de depósito comunitario o de calles generales, abarcando así el 92% de la población de Florianópolis (COMCAP, 2011). Además, la ciudad cuenta con 44 Puntos de Entrega Voluntaria (PEV's), estos son unos recipientes donde la población deposita envases de forma voluntaria. Están dispuestos en lugares cercanos a los puntos de gran flujo de personas y normalmente hay cuatro recipientes diferentes destinados a la disposición de un material desechable específico: papel, vidrio, plástico y latas.

Para incrementar aún más el volumen de material destinado al reciclaje, en 2008 se instaló el Ecocentro con el objetivo de establecer un punto específico para entrega voluntaria de neumáticos (Figura 46.a), aceite de cocina y otros materiales reciclables (Figura 46.b).



Figura 46. a) Neumáticos entregados al Ecocentro y b) Aceite de cocina entregado en el Ecocentro. Fuente: (COMCAP, 2011).

El sistema de recogida selectiva recoge papel, plástico, vidrio y metal, que son encaminados a las asociaciones de catadores registrados. Este servicio cuenta con una flota camiones con remolque como el que se muestra en la Figura 47.



*Figura 47. Camión remolque utilizado en la recogida selectiva. Fuente: (COMCAP, 2011).*

Por último, se ha desarrollado con carácter experimental un programa de **recogida** selectiva de residuos orgánicos. A pesar de esto, la mayor parte de los residuos orgánicos se encamina a la recogida convencional, envasada en bolsas plásticas bien cerradas, junto con otros desechos.

### Tratamiento de la recogida selectiva

Los residuos reciclables recogidos en Florianópolis por medio de la **recogida** selectiva, son encaminados al Centro de Transferencia de Residuos Selectivos, donde se clasifican de forma detallada en hierro, acero, aluminio, papel, plástico rígido, PET y plástico de película.

Actualmente los catadores realizan la clasificación, reciclaje y venta de basura selectiva, disponiendo así de una actividad que proporciona una renta para sostener a sus familias. La estructura física utilizada actualmente por la Asociación consiste en dos naves de 390 m<sup>2</sup> cada uno, donde reciben parte de la basura de la recogida selectiva de la ciudad (Ver Figura 48).

El material se aboca a la cinta transportadora donde ocurre el proceso de separación realizado de forma manual por las Asociaciones de Catadores. Cada tipo de reciclable recogido se pesa por separado, es empaquetado y almacenado, para posteriormente ser comercializado a las industrias correspondientes.



*Figura 48. Nave donde se depositan los residuos selectivos. Fuente: (COMCAP, 2011).*

El material recogido por la recogida selectiva no es totalmente reciclable, cerca del 12% es rechazado y se destina al vertedero.

## Tratamiento de la recogida convencional

Todos los residuos sólidos recogidos por el sistema de **recogida** convencional son encaminados hasta la Estación de Transbordo, ubicada en el mismo recinto donde se encuentra el Centro de Transferencia de Residuos Sólidos (CTReS). Este recinto tiene un área de 12 hectáreas y es punto estratégico para la gestión de la basura producida por la población de Florianópolis, pues todos los residuos recogidos en la ciudad son llevados allí donde se distribuyen para su destino final.

La primera etapa en el CTReS consiste en una trituración manual de los recipientes que contiene la basura doméstica. A continuación, se disponen sobre una cinta transportadora donde los catadores realizan la clasificación manual de los componentes reciclables como el papel, el plástico, los metales y el vidrio. Enviando estos materiales recuperados al Centro de Tratamiento de Residuos Selectivos.

La fracción restante que continua en la cinta transportadora e encaminada a un tamiz rotativo que tiene la función de separar el compuesto orgánico de los rechazos. La materia orgánica es depositada en el patio de compostaje ubicado dentro del CTReS y los rechazos que son transportados al vertedero.

En este recinto se encuentran también las asociaciones de catadores, los cuales separan los materiales reciclables y los trasladan al Centro de Tratamiento de Residuos Selectivos. También separan los residuos orgánicos, los cuales son recogidos especialmente por el equipo de la Asociación Orgánica y por la compañía "Directo del Campo" del Centro.

## Valorización

La valorización es el tratamiento que involucra un conjunto de actividades y procesos que tienen como objetivo común proporcionar el reciclaje de lo cartón, plástico, metal y vidrio. Estos materiales son vendidos a intermediarios o directamente a las fábricas de reciclaje.

Actualmente, el hierro, el acero y el vidrio son recogidos por los chatarreros de la región, el aluminio (latas, perfiles, etc.) es dirigido por los intermediarios. El papel o el cartón son comprados por recicladores. El PET y el plástico rígido son comprados directamente por industrias de la región. El plástico película es industrializado. Los envases multi-laminados son recogidos por los aparistas o chatarreros.

En el caso de los residuos orgánicos, el compostaje también es un mecanismo de valorización ya que tiene por objeto transformar la materia orgánica en compuesto para su utilización como fertilizante, una vez se realiza el proceso de compostaje.

## Disposición final

Los rechazos de los residuos sólidos domiciliarios son encaminados al vertedero, donde se depositan en células que quedan sobre el suelo impermeabilizado. Después de la descarga, el tractor separa la masa de residuos y el rodillo compactador ayuda a compactar la basura. Después de la compactación, la basura está cubierta con arcilla, siendo su dispersión realizada con la utilización de otro tractor, para evitar malos olores y la presencia de animales atraídos por la basura.

## 7.2.4. SGR DE PORTO ALEGRE

Porto Alegre es la capital y ciudad más grande del estado brasileño de Rio Grande do Sul, se trata de la capital más austral del estado brasileño. Su población de 1.409.351 habitantes (IBGE, 2010) la convierte en la décima ciudad más poblada del país.

Los habitantes de la ciudad brasileña de Porto Alegre, produjeron en 2016 un total de aproximadamente 400.000 toneladas de RSD (SNIS, 2016), los cuales deben ser tratados tal y como se indica en el Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Porto Alegre.

En la Figura 49 se muestra el camino que siguen los RSD durante toda su gestión, desde que salen de las casas hasta que se les brinda una segunda vida o bien son depositados en los verederos. En los siguientes apartados se detallan las etapas de la gestión.

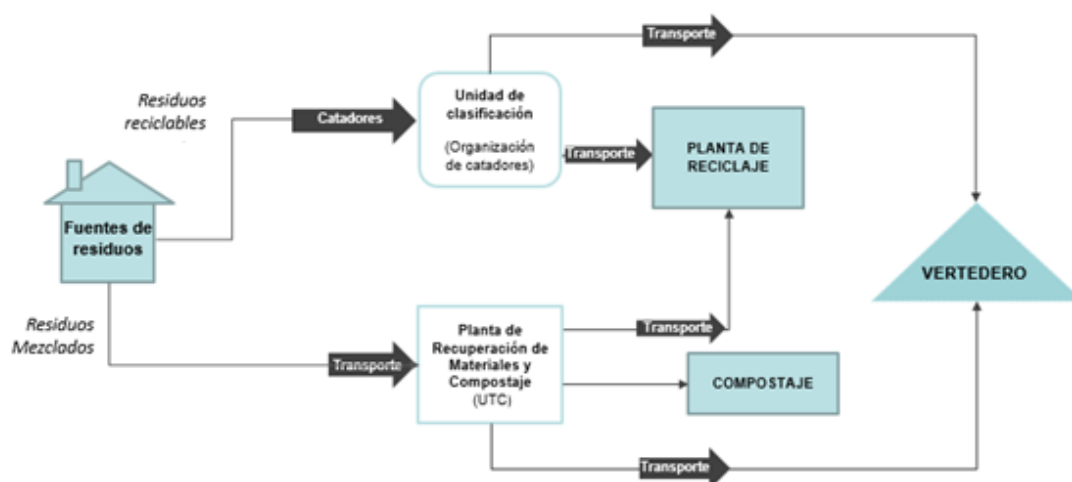


Figura 49. Flujograma del sistema de residuos domiciliarios de Porto Alegre. Fuente: Propia.

### Recogida y transporte

Los métodos de **recogida** de residuos domiciliarios (tanto selectiva como convencional) en Porto Alegre se dividen entre la sistema de recogida puerta a puerta y la entrega a contenedores. La Ley Complementaria 234/1990 (Código Municipal de Limpieza Urbana de Porto Alegre) establece que los residuos domiciliarios, en los locales donde la **recogida** tiene programación nocturna, deben ser obligatoriamente presentados en bolsas plásticas con un volumen de entre 20 litros y 100 litros (Ver Figura 50.a). En las zonas de recogida diurna, además de la utilización de las bolsas plásticas, el uso de contenedores para la deposición (normalmente se utilizan bidones de 100 litros) (Ver Figura 50.b). (PMGIRS Porto Alegre, 2013)





Figura 50. Recogida selectiva a) puerta a puerta y b) presentada en bidones. Fuente: (PMGIRS Porto Alegre, 2013).

Esta **recogida** puerta a puerta se efectúa en todas las vías públicas, incluso aquellas donde no existe la posibilidad de tráfico de vehículos, tales como favelas, villas populares, pasarelas de barrios, callejones estrechos o en el interior de urbanizaciones.

El sistema de **recogida** domiciliaria convencional puerta a puerta es efectuado por camiones compactadores. La recogida contenida en contenedores de los residuos domiciliarios convencionales, que se realiza en contenedores de 2,4 y 3,2 m<sup>2</sup> de capacidad que se realiza de forma automatizada.

La **recogida** selectiva implica separar los residuos en la fuente (en los locales donde se generan), conforme a su caracterización (papel / cartón, plástico, vidrio, metal o caucho). Atiende al 100% de los barrios de la ciudad, se realiza con camiones remolque sin compactación con capacidad de 26 m<sup>3</sup>, con 4 catadores por equipo, que hacen la carga y la descarga manual de los residuos.

Además en esta ciudad, también existen los llamados Puntos de Entrega Voluntaria de Residuos Reciclables - PEV's, los cuales corresponden a pequeñas áreas dotadas de contenedor y cobertura, a disposición de los ciudadanos para que éstos traigan y depositen en el lugar sus residuos reciclables previamente segregados.

Los residuos procedentes de la recogida selectiva son encaminados a las asociaciones o cooperativas de catadores para su reciclaje y valorización. Los residuos de la recogida convencional serán direccionados a la estación de transferencia de residuos sólidos denominada Estación de Transbordo Lomba del Pinheiro (ETLP), esta se encuentra dentro de un área donde también están instalada la Unidad de Triage y Compostaje de Residuos Sólidos Domiciliarios (UTC).

Con el objetivo de mejorar la logística de **recogida** y transporte de los residuos en el sentido de hacer más eficiente y económico el uso de los equipos de recogida, cuando hay grandes distancias a recorrer hasta los puntos de destino, se utilizan las estaciones de transferencia. Estas son instalaciones intermedias donde los residuos de los vehículos de recogida se transfieren generalmente a vehículos con capacidad de carga superior que conducen los residuos al lugar de destino final.

### Tratamiento de la recogida selectiva

Los residuos recogidos de forma selectiva se dirigen a dieciocho unidades de clasificación (UT). Estas unidades son locales especialmente diseñados y construidos para la clasificación,

empacamiento y almacenamiento de los materiales valorizables para su posterior comercialización por las asociaciones.

Los residuos en bolsas son colocados en la cinta donde los catadores realizan la separación de los materiales reciclables de forma manual, utilizando bidones de plástico para depositar cada tipo de material: plástico, papel, cartón, metal, vidrio, etc.

Estos materiales son transportados mediante carros al área destinada al área de prensado y al almacenamiento. Una vez prensados y enfardados serán conducidos a través de carritos de fardos para los boxes de almacenamiento, aguardando su transporte para posterior comercialización.

Los materiales son separados y especificados de acuerdo con sus características básicas, es decir, papel (blanco, cartón, mixto, periódico, multicapa, etc.), chatarra de hierro, aluminio (latas, laminas, chapas), metales no ferrosos (chatarra, hilo conductor, antimonio, cobre, acero inoxidable), plásticos (mezclas, PET, bolsas, PP, PVC), pedazos de vidrio, demás vidrios (botellas, botes de conserva o similares). También se separan y almacenan materiales que pueden venderse por unidad, como botellas o tarros de vidrio.

### **Tratamiento de la recogida convencional**

La meta principal perseguida en la Unidad de Triage y Compostaje (UTC) es el reciclaje de la fracción orgánica de los residuos domiciliarios a través del compostaje. Además de la recuperación de los materiales secos reciclables (metal, plástico, vidrio, papeles y otros), aún restante en los residuos recogidos. De los materiales reciclables se prioriza la separación de plásticos, metales y vidrios, teniendo en cuenta que el papel podrá ser descompuesto con la materia orgánica.

La primera etapa de esta planta se trata de la recepción de los residuos provenientes de la recogida domiciliar convencional. Estos son descargados por los camiones compactadores directamente en el edificio de recepción. En esta área hay un equipo electromecánico, denominado pólipo (controlado por un operador), para la carga de los residuos sobre la unidad de alimentación por gravedad, este sistema dispensa por la acción de la gravedad los materiales a cinta transportadora. Se prevén las descargas nocturnas para abastecer la cinta en las primeras horas del día.

La cinta alimenta la unidad de cribado. Los residuos son separados por su tamaño y densidad, las partículas más pequeñas y pesadas, es decir, la materia orgánica, es separada por medio de las pequeñas aberturas del medio de cribado y las partículas más grandes. La fracción orgánica separada es encaminada a un patio de compostaje en pilas a cielo abierto en un área anexa al local de traje. El resto de los residuos siguen a través de la cinta transportadora para la recuperación de los materiales reciclables.

Los colectores realizan tamizado manual desde una cinta transportadora, esta técnica es la más simple y más utilizada de clasificación, donde se retiran los residuos recuperables y se dejan en la cinta los desechos. El material separado se encamina a las prensas y, después del prensado, es almacenado para la venta. Los residuos sólidos urbanos no reaprovechados y no reciclados son compactados y destinados al vertedero.

El lixiviado producido en el proceso de compostaje es recirculado por irrigación de las lechadas de compostaje para mantener la banda ideal de humedad en el proceso. El líquido excedente se transporta y se extiende a la estación de tratamiento de las aguas residuales. Los líquidos



producidos en el compostaje de UTC se recuperan por el sistema de drenaje y se almacenan en cuatro tanques.

### Valorización

Con la comercialización de los residuos valorizables provenientes de la recogida selectiva y recogida convencional, los catadores de Porto Alegre sacan su sustento económico.

En el caso de los residuos orgánicos, también es un mecanismo de valorización ya que tiene por objeto transformar la materia orgánica en compuesto para su utilización como fertilizante, una vez se realiza el proceso de compostaje.

### Disposición final

Actualmente el lugar de destino final de los residuos no reaprovechados o ni reciclados en el municipio de Porto Alegre es el Vertedero de la Central de Residuos del Recreo – ASCRR. El cual tiene un área de 73 ha y un volumen de 5.537.100 m<sup>3</sup>, con capacidad de aporte de 90.000 t / mes, con una vida útil de 23 años (Ver Figura 52).

Este vertedero es privado y está a una distancia de unos 110 km de Porto Alegre, siendo un terraplén que tiene quema central del biogás y el tratamiento de los lixiviados.



*Figura 51. Vertedero de Porto Alegre. (PMGIRS Porto Alegre, 2013).*

### 7.3. ANÁLISIS DE RESULTADOS Y PROPUESTA DE MEJORAS

Después de analizar los SGR de Brasília, Florianópolis, Porto Alegre y Goiânia, se procede a estudiar las medidas que podrían resultar positivas y que son potencialmente aplicables para el sistema de gestión de residuos de João Pessoa.

La incorporación de dichas medidas tiene la finalidad de favorecer el cumplimiento de la legislación vigente y reducir el impacto medioambiental que se produce durante el tratamiento de los residuos domiciliarios.

Tras el análisis realizado en el apartado anterior se observa cómo, a diferencia de en João Pessoa, el sistema de recogida de materiales reciclables de forma selectiva en las ciudades estudiadas sí atiende a la totalidad o casi la totalidad de la población. Por este motivo el índice de reciclabilidad de estas ciudades es mucho más elevado que en João Pessoa, tal y como se muestra en la Tabla 8.

Tanto la recogida selectiva como la recogida convencional se realizan con el sistema puerta a puerta en todas las ciudades analizadas. Además, en Florianópolis, desde 2003 la recogida convencional se realiza con camiones automatizados, mejorando la eficiencia y la calidad de trabajo de los catadores.

Por otro lado, en Brasília, Florianópolis y Porto Alegre el tratamiento de los residuos domiciliarios es similar. En las tres ciudades la valorización de dichos residuos se realiza a través de la recogida selectiva, el reciclaje y el compostaje.

Para ello, estas ciudades cuentan con unidades de Tratamiento Mecánico Biológico o de Compostaje, con instalaciones mucho más preparadas para la separación de residuos que la de João Pessoa, donde se ha visto que el triaje se realiza casi exclusivamente de manera manual.

En estas unidades de tratamiento los residuos convencionales son gestionados con la finalidad de separar la fracción reciclable de la materia orgánica, pudiendo realizar así compost, que puede servir de abono, por ejemplo, para huertos comunitarios, como es en el caso de Florianópolis. Además, con ello se disminuye la materia orgánica depositada en el vertedero y por lo tanto su impacto ambiental.

Gracias a las tecnologías que tienen estas plantas, la eficiencia de recuperación de materiales es mucho mayor, principalmente en Brasília, tal y como muestra la Tabla 9, en la que se compara la eficiencia de la Planta de Tratamiento Mecánico Biológico de la capital brasileña con la PRM de João Pessoa. Los principales cambios que presentan las plantas con mejor comportamiento son la incorporación de electroimanes, trómeles y, en general, la mejora de la automatización de la separación de residuos.

	Brasilia	João Pessoa (2018)
<b>Eficiencia Valorización de materiales reciclables de la Planta de Tratamiento Mecánico Biológico o de la PRM</b>	<b>4,2 %</b>	<b>0,90 %</b>
<b>Compostaje</b>	<b>18,2 %</b>	<b>0 %</b>
Referencias	PMGIRS Brasilia	Fuente Propia

*Tabla 9. Porcentaje de la población atendida por la recogida selectiva y el porcentaje de material reciclable que se recoge en esta recogida.*

Esta mayor eficiencia y la aplicación del compostaje se ve reflejado en los buenos resultados que obtiene esta ciudad en cuanto a tasas de reciclaje y vertido, tal y como se ha visto en la Tabla 8.

Por último, Goiânia también gestiona los residuos domiciliarios a través de la recogida selectiva y el reciclaje, pero no posee de la infraestructura necesaria para producción de compostaje. La particularidad que presenta esta ciudad en exclusiva es el tratamiento que se realiza en el vertedero sobre los gases y líquidos generados (lixiviados).

Después de este análisis de las ciudades brasileñas con mejores tasas de recuperación, se proponen como mejoras para incorporar en el Sistema de Gestión de Residuos de João Pessoa las siguientes:

- Optimización de la recogida selectiva
- Optimización de la PRM
- Introducción del compostaje

A continuación, se describe cada una de las mejoras propuestas.

### 7.3.1.MEJORA I: OPTIMIZACIÓN DE LA RECOGIDA SELECTIVA

Tal y como se ha descrito en el Apartado 6.2.1.1, la recogida selectiva en el municipio de João Pessoa se realiza combinando camiones con vehículos muy rudimentarios de bajo rendimiento, como carretas tiradas por caballos o burros o vehículos que son directamente empujados por los catadores.

En João Pessoa, solamente el 17,32% de la ruta se realiza con vehículo a motor. Este bajo porcentaje se refleja en los resultados de la recogida: en 2018 solo el 0,63% de los residuos eran recogidos con este método, el resto de forma convencional (99,37%) (Ver Figura 20).

La utilización de vehículos con menor capacidad de carga obliga a este a volver al punto de destino con una elevada frecuencia, lo que perjudica al porcentaje de tiempo efectivamente dedicado a la recogida. Los vehículos más grandes, como los camiones, tienen mayor coste pero su alta capacidad mejora la eficiencia, ya que destinan menos tiempo de su jornada a las tareas de recogida (ECOEMBES, 2010).

Para mejorar la tasa de reciclabilidad, es necesario mejorar los equipos de recogida aumentando la flota de camiones para así ampliar las rutas donde se ofrece el servicio de recogida puerta a puerta, con el propósito de llegar a atender al máximo de población posible, tal y como ya se viene haciendo en la recogida convencional.

Con la utilización de vehículos a motor en una mayor parte de la ruta de la recogida selectiva se aumentará la eficiencia de esta, ya que se agilizará el trabajo de los catadores. Al tratarse de vehículos con mayor capacidad de carga, los viajes a los núcleos serán menores, por lo que toda la recogida se realizará en menos tiempo. Además, también es importante resaltar que, con esta mejora en los vehículos de recogida, se dignificará el trabajo de los catadores.

La propuesta de ampliar las rutas de recogida selectiva con vehículos a motor de mayor capacidad se evaluará en dos niveles de aplicación: un nivel mínimo (Smin) y un nivel máximo (Smax). A continuación, en la Tabla 10 se explica la nomenclatura que se utiliza para cada nivel, teniendo en cuenta que también existe la posibilidad de que no se aplique esta mejora (S0).

La nomenclatura utilizada así como los porcentajes de recogida selectiva respecto al total de residuos recogidos definido en cada uno de estos niveles se resumen en la Tabla 10 y se explican seguidamente:

Porcentaje de recogida selectiva		
No se aplica ninguna mejora en la recogida selectiva	S0	0,63 %
Se aplica una mejora en la recogida selectiva con un valor mínimo	Smin	0,73 %
Se aplica una mejora en la recogida selectiva con un valor máximo	Smax	1,45 %

*Tabla 10. Nomenclatura utilizada y porcentajes de recogida selectiva respecto al total de residuos recogidos.*

*Fuente: Propia.*

Los porcentajes que se muestran en la Tabla 10 se han tomado de las siguientes fuentes:

- S0, es el porcentaje de recogida selectiva respecto a los RSD recogidos que se da en João Pessoa en 2018

- Smin, es el 50% de Smax.
- Smax, es el porcentaje de recogida selectiva respecto a los RSD recogidos que se da en Brasilia en 2016 (PDGRIS Brasilia, 2018).

Para llegar a conseguir estas tasas de recogida selectiva es necesario ampliar las rutas con los camiones para así aumentar la eficiencia de recogida. En la Tabla 11 se propone la aplicación de estas rutas para cada nivel. Los datos se muestran tanto en kilómetros como en tanto por ciento y también se expone el recorrido que cubre en los barrios de João Pessoa y en total.

Recogida y transporte inicial	S0		Smin		Smax	
	Porcentaje uso camiones	Ruta con camiones (km)	Porcentaje uso camiones	Ruta con camiones (km)	Porcentaje uso camiones	Ruta con camiones (km)
Barrio dos Estados	10 %	17,26	50 %	86,30	100 %	172,59
Barrio Caic	20 %	18,60	50 %	46,49	100 %	92,98
Barrio Cabo Branco	20 %	28,39	80 %	113,55	100 %	141,94
Barrio Bessa	25 %	37,65	80 %	120,47	100 %	150,58
Barrio Mangabeira	15 %	33,94	80 %	181,03	100 %	226,29
<b>Total João Pessoa</b>	<b>17,32%</b>	<b>135,83</b>	<b>69,84%</b>	<b>547,84</b>	<b>100%</b>	<b>784,39</b>

*Tabla 11. Porcentaje del uso de camiones en la recogida selectiva y por lo tanto recorrido que cubren en las diferentes rutas propuestas Fuente: Propia.*

En el PLANO 1, PLANO 2 Y PLANO 3 se muestran las áreas cubiertas por la recogida selectiva sin ninguna mejora (S0), con la optimización del uso de camiones a nivel mínimo (Smin) y con la utilización de camiones al nivel máximo (Smax) respectivamente.

Los camiones que se utilizarán en estas rutas serán camiones remolque de 4 toneladas de capacidad como el que se observa en la Figura 52.



*Figura 52. Camión remolque utilizado en la recogida selectiva. Fuente: (João Pessoa, 2014)*

Como ya se ha mencionado anteriormente, al aumentar el recorrido realizado por los camiones en la recogida selectiva, se hace necesario ampliar la flota. En la Tabla 12 se muestra el número de camiones estimado como necesario para cada nivel:

	Smin	Smax
Número de camiones necesarios:	6	8

Tabla 12. Flota de camiones necesaria para la recogida selectiva ampliando las rutas al nivel Smin y al nivel Smax.

Fuente: Propia

Para el cálculo del número de camiones a incorporar en las respectivas flotas se ha utilizado la Ecuación 1:

$$N = \frac{1}{J} \cdot \left[ \frac{L}{V_r} + 2 \cdot \frac{D_g}{V_t} + 2 \cdot \frac{D_d}{V_t} \cdot \frac{Q}{C} \right]$$

Ecuación 1. Ecuación para el dimensionamiento de una flota de camiones.

Fuente: (Porto Alegre, 2013)

- N: Número de camiones  
 J: Jornada de trabajo (h)  
 L: Ruta (km)  
 Vr: Velocidad media de recogida (se estima entre 4 y 6,5 km/h)  
 Dg: Distancia entre el garaje y el centro geométrico de la recogida (km)  
 Vt: Velocidad de transporte (se estima entre 15 y 30 km/h)  
 Dd: Distancia entre la planta de tratamiento y el centro geométrico de la recogida (km)  
 Q: Cantidad de residuos recogidos por jornada laboral (Tn)  
 C: Capacidad del camión (Tn) - Considerar el 70% de la capacidad nominal  
 Adoptar un 10% adicional para cubrir el mantenimiento y un 5% para emergencias

Los valores de cada uno de los parámetros para los dos niveles de aplicación se exponen en la Tabla 13:

	J	L	Vr	Dg	Vt	Dd	Q	C
<b>Smin</b>	8 h	547,84 km	6,5 km/h	1 km	30 km/h	1 km	86,17 Tn <sup>1</sup>	2,8 Tn
<b>Smax</b>	8 h	784,39 km	6,5 km/h	1 km	30 km/h	1 km	172,34 Tn <sup>2</sup>	2,8 Tn

Tabla 13. Valores tomados para el cálculo de la flota de camiones de la recogida selectiva para los dos nuevos niveles de aplicación definidos (Smin y Smax). Fuente: Propia.

Por último, cabe destacar que con el aumento de las rutas en las que se utilice un camión para la recogida selectiva, además de aumentar el número de toneladas de residuos reciclables recogidos también se aumenta el consumo de diésel. Por este motivo es necesaria la evaluación ambiental del comportamiento global de los escenarios que incorporen esta medida, para saber si compensa o no y en qué nivel es más beneficiosa.

El impacto ambiental de las mejoras propuestas se evaluará en el Bloque III del trabajo con el estudio del ACV, en el que se incluye y detalla la cuantificación del consumo de diésel para cada escenario propuesto.

<sup>1</sup> Considérese que los residuos selectivos se recogen 8 veces al mes. La cantidad de residuos recogidos de forma selectiva en Smin es de 8272,5 Tn (3,15% de los RSD de 2018)

<sup>2</sup> Considérese que los residuos selectivos se recogen 8 veces al mes. La cantidad de residuos recogidos de forma selectiva en Smax es de 16545 Tn (6,29% de los RSD de 2018)

### 7.3.2.MEJORA II: OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA DE RECUPERACIÓN DE MATERIALES

La Planta de Recuperación de Materiales en João Pessoa cuenta simplemente con 3 cintas transportadoras sobre las que se realiza un triaje manual (ver Apartado 6.1.3). Para mejorar su eficiencia es necesario introducir nuevos procesos y tecnologías de separación de las diferentes fracciones del flujo de residuos. A continuación, se describe el proceso que se propone llevar a cabo para conseguir incrementar el rendimiento en el proceso de selección de materiales.

La finalidad de esta planta es la separación de los residuos sólidos reciclables y la materia orgánica de los desechos, para poder valorizarlos y/o darles una segunda vida. En la Figura 53, se muestra el flujograma con la propuesta de mejora tecnológica a incorporaren la PRM. A continuación, se describe paso a paso el proceso que se propone llevar a cabo en esta planta.

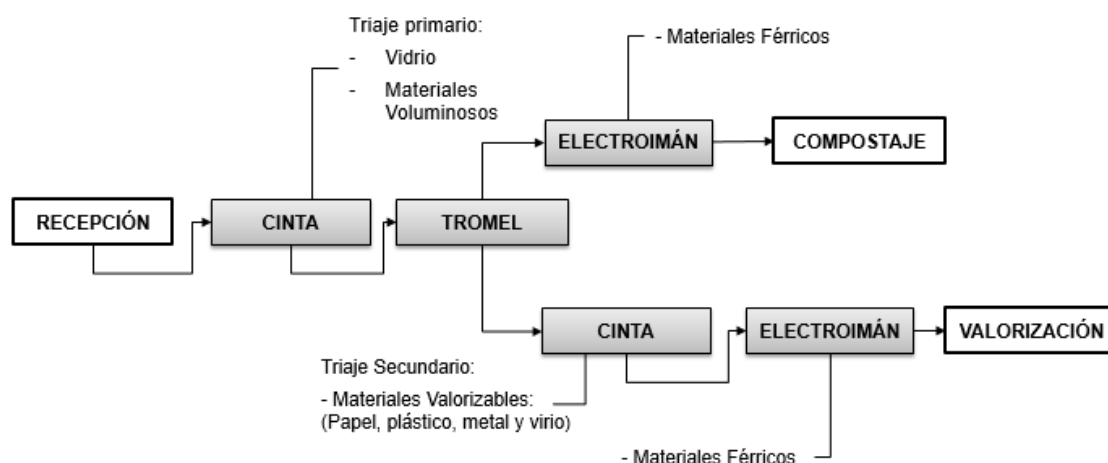


Figura 53. Flujograma de las etapas en el Área de Clasificación de los Residuos. Fuente: Propia.

La primera etapa del proceso es la recepción residuos recogidos de forma convencional, los camiones descargan los residuos en esta área y se alimenta la cinta transportadora, podría realizarse con un “pulpo” mecánico o utilizar carretillas transportadoras.

Seguidamente, esta cinta transportaría los residuos hasta la posición de triaje primario. En este triaje, los catadores retirarían los materiales más voluminosos a mano y, en particular, el vidrio, el cual puede deteriorarse en el posterior trómel de cribado.

Tras la etapa de triaje primario, se instalará un trómel de cribado dotado de cuchillas rompe bolsas. En este equipo se procede a la rotura y descarga de las bolsas de residuos, separándose éstos mediante cribado en dos fracciones: finos de composición fundamentalmente orgánica y gruesos de composición fundamentalmente inorgánica.

A continuación, la materia orgánica se hará pasar por un electroimán para recuperar los metales férricos, mientras que la fracción gruesa, de composición fundamentalmente inorgánica, se dirigirá a un triaje secundario para recuperar las diferentes fracciones valorizables contenidas en los residuos. Dicha fracción, requerirá ser conducida mediante otra cinta transportadora para realizar la selección manual de los materiales valorizables: Papel, cartón, vidrio, plástico y metal. A final de la línea de selección manual se colocará otro electroimán para una mejor recuperación de los metales férricos.

Cada una de las fracciones recuperadas en estas operaciones se considera que necesita ser compactada y embalada antes de su posterior traslado a las plantas recicladoras. El flujo de residuo resultante de la línea de la fracción gruesa se considera rechazo y, por tanto, es finalmente conducido al vertedero. El flujo resultante de la línea de la fracción fina está compuesto mayoritariamente de materia orgánica, por lo que se destina a una planta de compostaje.

La propuesta de mejorar la eficiencia de recuperación de materiales reciclables en la PRM también se aplicará en dos niveles, uno mínimo (Cmin) y uno máximo (Cmax), teniendo en cuenta que también existe la posibilidad de que no se aplique ninguna mejora (C0).

A cada uno de los niveles aplicados a la mejora de la eficiencia de la Planta de Recuperación de Materiales se le asocia un porcentaje de recuperación de materiales reciclables respecto al total de residuos gestionados allí. Estos porcentajes se resumen en la Tabla 14 y se explican seguidamente:

Porcentaje de eficiencia de la PRM		
No se mejora la eficiencia de la PRM	C0	0,90 %
Se mejora la eficiencia de la PRM en un valor mínimo	Cmin	2,10 %
Se mejora la eficiencia de la PRM en un valor máximo	Cmax	4,20 %

*Tabla 14. Nomenclatura utilizada y porcentajes de los materiales recuperados en la PRM, respecto a la cantidad de residuos gestionados en la planta. Fuente: Propia.*

Los porcentajes que se muestran en la Tabla 14 se han tomado de las siguientes fuentes:

- C0, es el porcentaje de recuperación de materiales reciclables respecto a total de residuos gestionados en la en la PRM en 2018 (João Pessoa).
- Cmin, es el 50% de Cmax.
- Cmax, es el porcentaje de recuperación de materiales reciclables respecto a total de residuos gestionados en la en la Planta de Triage y Compostaje de Brasília en 2016 (PDGRIS Brasília, 2018).

Tal y como se ha detallado, para llegar a conseguir estas eficiencias de recuperación, es necesario mejorar el proceso que se realiza en la Planta de Recuperación de Materiales, para lo que hay que realizar una inversión en nuevos equipos que aumenten la eficiencia y la calidad.

En la Tabla 15 se enumeran las tecnologías mínimas propuestas, que deberían implantarse para cumplir con esta medida:

Designación	Unidades
Alimentador	1
Trómel abre bolsas	1
Electroimán	2
Recipiente para el reciclaje	10

*Tabla 15. Número mínimo de equipos necesarios para la optimización de la PRM. Fuente: Propia*

Por último, es necesario destacar que con la incorporación de nuevos equipos en la Planta de Reciclaje de Materiales, se conseguirá aumentar la eficiencia y por lo tanto las tasas de



reciclabilidad, pero al mismo tiempo se aumentará el consumo de electricidad. Otra vez más se hace necesario el análisis ambiental para evaluar el comportamiento global de los escenarios que incorporaran esta medida.

El impacto ambiental de las mejoras propuestas se evaluará en el Bloque III del trabajo con el estudio del ACV, donde se cuantificará el consumo para cada escenario propuesto que incorpore dicha mejora.

### 7.3.3.MEJORA III: COMPOSTAJE DE LA MATERIA ORGÁNICA

Tal y como se ha analizado en el Apartado 6.1.3, en la PRM de João Pessoa sólo se separan los materiales reciclables del resto (materia orgánica e inorgánica) para que sean de nuevo introducidos al proceso industrial. Es decir, el rechazo que no se recicla es enviado directamente al vertedero, sin separar la fracción orgánica.

La fracción de materia orgánica recogida convencionalmente influye en los impactos ambientales generados por la basura, ya que su presencia dificulta el tratamiento de la basura reciclable y aumenta el volumen de residuos dispuestos en el vertedero.

Por lo tanto, para reducir el impacto que tienen los residuos orgánicos en el vertedero se propone recuperar estos residuos en la PRM y tratarlos para producir compost.

El primer paso para introducir el compostaje es la necesidad de incluir la tecnología necesaria en la Planta de Recuperación de Materiales que permitan separar la fracción orgánica del resto de residuos. Este proceso ya ha sido definido en el apartado anterior, en el cual se propone la mejora de optimización de la PRM, en la que se ha tenido en cuenta la incorporación de la tecnología necesaria que facilite la separación de la materia orgánica.

Es decir, consecuentemente este apartado depende del anterior, puesto que para que la producción de compost tenga lugar se debe optimizar también la PRM. Posteriormente, una vez separada la materia orgánica del resto de los residuos, esta se encaminará hacia el patio de compostaje.

La técnica del compostaje puede realizarse en un ambiente abierto (compostaje natural) o cerrado (compostaje acelerado). En Brasil, el método más común utilizado es el compostaje a cielo abierto (ver Apartado 4.2.4.2).

Este método es más sencillo y económico, consiste colocar en un patio a cielo abierto la porción de materia orgánica recuperada, formando pilas en filas (Ver Figura 54), de aproximadamente 1 m de altura y 2 m de ancho de base, para giro manual, y 2 m de altura y 4 m de base para giro mecánico (Costa et al., 2016).



Figura 54. Pilas de compost. Fuente: (Costa et al., 2016).

Debido a las reacciones derivadas del metabolismo de los microorganismos, algunos días después de la temperatura se eleva a aproximadamente 70°C. Para un suministro adecuado de oxígeno, debe haber una agitación cada tres días, después de lo cual la temperatura alcanzará nuevamente la temperatura de 70 ° C, y así sucesivamente hasta el día 70, cuando el material se semicura y la temperatura se estabiliza cerca de la temperatura ambiente. De esta manera, el compuesto estará listo para su uso entre 90 y 120 días (Costa et al., 2016).

La propuesta de introducir la el compostaje se aplicará en dos niveles, uno mínimo (Cmin) y uno máximo (Cmax), teniendo en cuenta que también existe la posibilidad de que no se aplique esta mejora (C0).

Como se observa se utiliza la misma nomenclatura que en el apartado anterior (mejora de la PRM) debido a que se ha considerado que la optimización de la PRM y la introducción al compostaje se realizarán conjuntamente. Es decir, en el caso en el que se mejora la eficiencia de la PRM y por lo tanto se separa la fracción orgánica, se considera que esta se aprovecha para realizar compost.

Esta decisión viene motivada por dos razones, la primera de todas es por la consideración de que es una pérdida de capacidad productiva en la PRM separar la materia orgánica y después acabar desechándola en el vertedero. Y además como se ha comentado, el proceso de compostaje depende de la optimización de la PRM, ya que si esta mejora no se aplica, la mejora del compostaje no puede realizarse.

Una vez aclarado este concepto, en la Tabla 16 se exponen cada uno de los porcentajes que se aplica a la producción de compost en cada uno de los niveles. Estos porcentajes representan la cantidad de materia orgánica recuperada en la PRM en función de los residuos que se gestionan en esta planta.

Introducción al compostaje		
No introduce la medida del compostaje	C0	0 %
Se introduce el compostaje en un valor mínimo	Cmin	9,15 %
Se introduce el compostaje en un valor máximo	Cmax	18,29 %

*Tabla 16. Nomenclatura utilizada y porcentajes de compostaje respecto a los residuos procesados en la PRM.*

*Fuente: Propia*

Los porcentajes que se muestran en la Tabla 16 se han tomado de las siguientes fuentes:

- C0, es el porcentaje de recuperación de materia orgánica en la PRM en 2018 (João Pessoa).
- Cmin, es el 50% de Cmax.
- Cmax, es el porcentaje de recuperación de materia orgánica en función del total gestionado en la Planta de Triaje y Compostaje de Brasília en 2016 (PDGRIS Brasília, 2018).

Para la introducción del compostaje también es necesario realizar una inversión tecnológica. En la Tabla 17 se muestra los elementos necesarios. Cabe señalar que en el vertedero de João Pessoa ya se contempla un espacio para esta práctica, por lo que no será necesario una ampliación del terreno.

Designación	Unidades
Mini cargadora	1
Termómetro infrarrojo	1

*Tabla 17. Número mínimo de equipos necesarios para la introducción al compostaje.*

*Fuente: Propia*

Por último, hay que tener en cuenta que el compostaje también tiene impactos negativos para el medio ambiente debido a la emisión fugitiva de gases de efecto invernadero (Zulkepli, N. E. et al., 2017) y por el consumo de diésel que producen las mini cargadoras. Por lo tanto, en el estudio ambiental que se realiza en el apartado 8.3, se compara si los beneficios ambientales que el compostaje conlleva son más relevantes que depositar los desechos en el vertedero.

El impacto ambiental de las mejoras propuestas se evaluará en el Bloque III del trabajo con el estudio del ACV que cuantificará el consumo para cada escenario propuesto con la mejora.

## 7.4. CONFIGURACIÓN DE ESCENARIOS ALTERNATIVOS

En este apartado se han confeccionado los escenarios alternativos teniendo en cuenta las tres medidas de mejora identificadas en el apartado anterior: la optimización de las rutas de recogida selectiva, la mejora de la eficiencia de la PRM y la introducción del proceso de compostaje.

En total se han configurado ocho escenarios alternativos, además del escenario BASE, a partir de la combinación de las propuestas de mejora planteadas, cuyos ciclos de vida serán evaluados ambientalmente.

En la Tabla 18, se presenta una lista resumen con las mejoras que se incluyen en cada uno de estos escenarios y con qué niveles de aplicación se definen. Como ya se ha comentado en el apartado anterior, la optimización de la PRM y la introducción al compostaje se implementan conjuntamente.

Código:			MEJORA I: Optimización de la recogida selectiva			MEJORA II: Optimización de la PRM			MEJORA III: Introducción del compostaje		
			No hay mejora	Mejora mínima	Mejora máxima	No hay compostaje	Compostaj e mínimo	Compostaj e máximo	No hay compostaje	Compostaj e mínimo	Compostaj e máximo
9 ESCENARIOS	E0	S0, C0	•			•			•		
	E1	Smin, C0		•		•			•		
	E2	Smax, C0			•	•			•		
	E3	S0, Cmin	•				•			•	
	E4	S0, Cmax	•					•			•
	E5	Smin, Cmin		•			•			•	
	E6	Smax, Cmax			•			•			•
	E7	Smax, Cmin			•		•			•	
	E8	Smin, Cmax		•				•			•

Tabla 18. Resumen de las mejoras introducidas en los escenarios propuestos. Fuente: Propia.

A continuación, en la Figura 55 se expone un flujograma resumen con los porcentajes del SGR más importantes para cada escenario. Posteriormente, en la Tabla 19 y la Tabla 20 se muestran las cantidades de los flujos de residuos que atraviesan el SGR para cada uno de los escenarios.

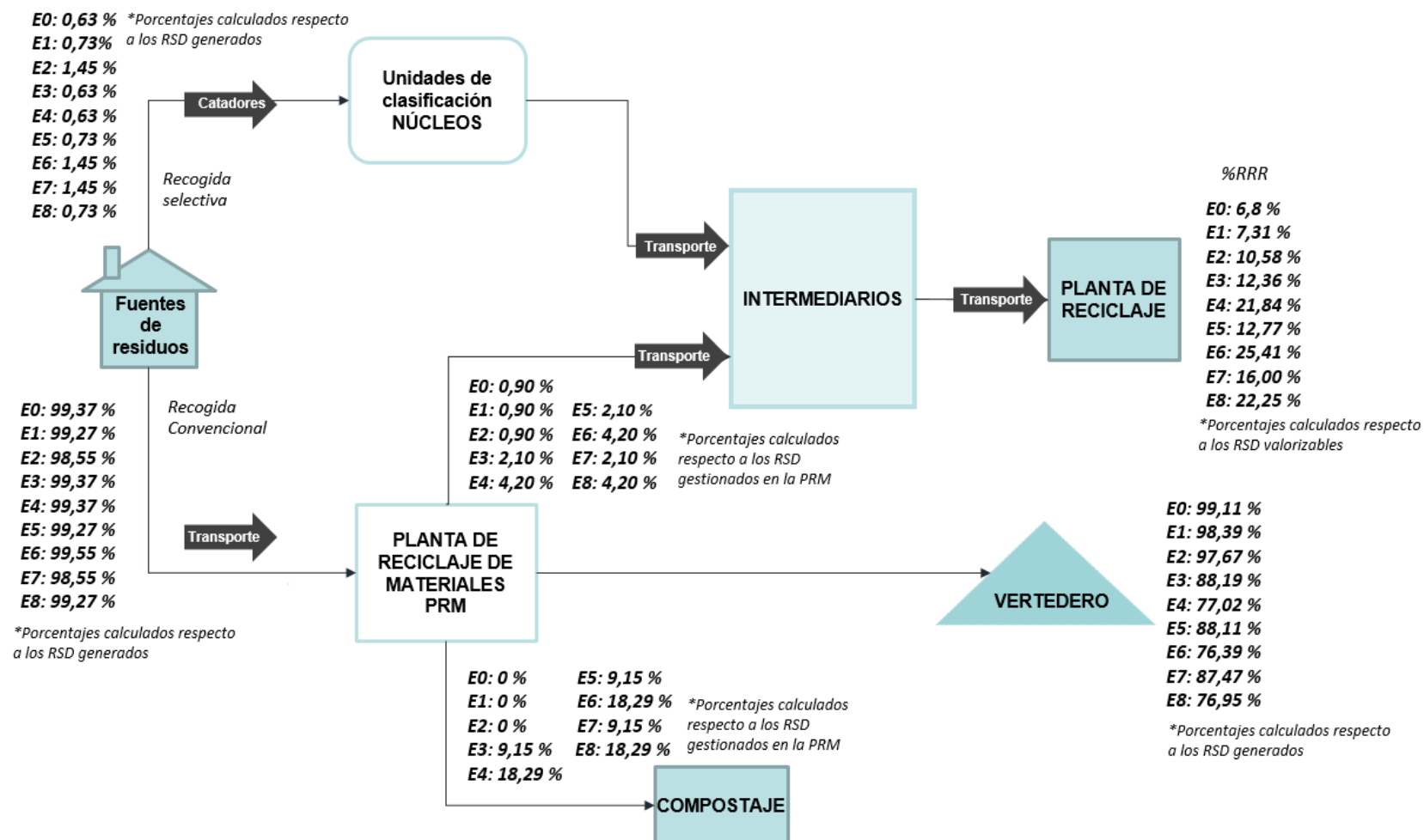


Figura 55. Flujograma de los escenarios propuestos. Fuente: Propia

	Escenario 1 (Tn)	Escenario 2 (Tn)	Escenario 3 (Tn)	Escenario 4 (Tn)
Residuos generados (Tn)	258.921	258.921	258.921	258.921
Residuos recogidos por la recogida selectiva (Tn)	1.877,18	3.754,35	1.636,19	1.636,19
Papel (Tn)	881,77	1.763,54	768,57	768,57
Plástico (Tn)	360,59	721,18	314,30	314,30
Metal (Tn)	303,04	606,09	264,14	264,14
Vidrio (Tn)	323,99	647,99	282,40	282,40
Caucho (Tn)	7,78	15,56	6,78	6,78
Residuos mixtos recogidos por la recogida convencional (Tn)	257.043,82	255.166,65	257.284,81	257.284,81
Residuos recuperados en la PRM (Tn)	2.287,69	2.270,98	5.402,98	10.805,96
Papel (Tn)	826,86	820,82	1.952,83	3.905,67
Plástico (Tn)	1009,37	1002,0	2.383,89	4.757,79
Metal (Tn)	310,95	308,68	734,39	1.468,79
Vidrio (Tn)	25,83	25,64	60,99	121,96
Caucho (Tn)	114,70	113,86	270,89	541,78
Compost (Tn)	0	0	23.528,7	47.057,39
Material valorizado	4.164,87	6.025,34	7.039,17	12.442,15
Papel (Tn)	1.708,62	2.584,35	2.721,40	4.674,24
Plástico (Tn)	1.369,96	1.723,18	2.698,19	5.082,09
Metal (Tn)	614,0	914,77	998,53	1.732,93
Vidrio (Tn)	349,82	673,62	343,39	404,39
Caucho (Tn)	122,48	129,42	277,67	548,56
Vertedero (Tn)	254.756,13	252.895,66	228.353,13	199.421,46
Materia Orgánica (Tn)	126.871,30	126.871,30	103.342,60	79.813,90
Papel (Tn)	19.005,06	18.129,33	17.992,28	16.039,44
Plástico (Tn)	24.522,14	24.168,92	23.193,91	20.810,01
Metal (Tn)	1.975,21	1.674,44	1.590,68	856,28
Vidrio (Tn)	4.828,60	4.504,78	4.835,03	4.774,03
Caucho (Tn)	2.466,73	2.459,79	2.311,54	2.040,65
Resto (Tn)	75.087,09	75.087,09	75.087,09	75.087,09

Tabla 19. Cantidades de residuos que atraviesan los SGR de los Escenarios 1, 2, 3 y 4

	Escenario 5 (Tn)	Escenario 6 (Tn)	Escenario 7 (Tn)	Escenario 8 (Tn)
Residuos generados (Tn)	258.921	258.921	258.921	258.921
Residuos recogidos por la recogida selectiva (Tn)	1.877,18	3.754,35	3.754,35	1.877,18
Papel (tn)	881,77	1.763,54	1.763,54	881,77
Plástico (Tn)	360,59	721,18	721,18	360,59
Metal (Tn)	323,99	606,09	606,09	323,99
Vidrio (Tn)	323,99	647,99	647,99	323,99
Caucho (Tn)	7,78	15,56	15,56	7,78
Residuos mixtos recogidos por la recogida convencional (Tn)	257.043,82	255.166,65	255.166,65	257.043,82
Residuos recuperados en la PRM (Tn)	5.397,92	10.717,00	5.358,50	10.795,84
Papel (Tn)	1.951,01	3.873,51	1.936,76	3.902,01
Plástico (Tn)	2.381,66	4.728,53	2.364,27	4.763,32
Metal (Tn)	733,71	1.456,69	728,35	1.467,41
Vidrio (Tn)	60,94	120,98	60,49	121,87
Caucho (Tn)	270,64	537,32	268,66	541,27
Compost (Tn)	23.506,66	46.669,98	23.334,99	47.013,32
Material valorizado (Tn)	7.275,10	14.471,35	9.112,85	12.673,02
Papel (Tn)	2.832,77	5.637,05	3.700,30	4.783,78
Plástico (Tn)	2.742,25	5.449,72	3.085,45	5.123,91
Metal (Tn)	1.036,75	2.062,78	1334,43	1.770,46
Vidrio (Tn)	384,93	768,97	708,48	445,87
Caucho (Tn)	278,42	552,88	284,22	549,05
Vertedero (Tn)	228.139,24	197.779,67	103.536,3	199.234,67
Materia Orgánica (Tn)	103.364,6	80.201,31	103.536,30	79.857,97
Papel (Tn)	17.880,91	15.076,63	17.013,38	15.929,9
Plástico (Tn)	23.149,85	20.442,38	22.806,65	20.768,19
Metal (Tn)	1.552,46	526,43	1.254,77	818,75
Vidrio (Tn)	4.793,49	4.409,45	4.469,94	4732,55
Caucho (Tn)	2.310,80	2.036,33	2.304,99	2.040,16
Resto (Tn)	75.087,09	75.087,09	75.087,09	75.087,09

Tabla 20. Cantidades de residuos que atraviesan los SGR de los Escenarios 5, 6, 7 y 8

## 8. BLOQUE III: APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA ACV AL CASO DE ESTUDIO

En el siguiente apartado se explican todas las etapas seguidas para la aplicación de la metodología del Análisis del Ciclo de Vida (ACV) para los nueve escenarios propuestos.

### 8.1. ETAPA I: DEFINICIÓN DE OBJETIVOS Y ALCANCE

#### 8.1.1. DEFINICIÓN DE OBJETIVOS

El objetivo principal del ACV desarrollado es comparar el impacto ambiental que tiene el actual sistema de gestión de residuos domiciliarios de João Pessoa, con los sistemas propuestos en cada uno de los escenarios alternativos definidos.

Lo que se pretende es conocer la influencia o contribución que cada escenario tiene sobre cinco categorías de impacto para identificar cuál tienen mejor comportamiento ambiental: Acidificación, Eutrofización, Calentamiento Global, Oxidación Fotoquímica y Destrucción de la Capa de Ozono.

De esta manera, se puede identificar el sistema de gestión con mejor comportamiento, así como las variables clave, que permiten aumentar la sostenibilidad de dicho sistema.

#### 8.1.2. DEFINICIÓN DEL ALCANCE

Como entradas al sistema además de los RSD se enumeran: el combustible, la electricidad o el agua. Como salidas se tiene las emisiones al aire, las emisiones al agua, los flujos de materiales sólidos y los productos extraídos para su comercialización. La figura 56 representa gráficamente los límites del sistema en forma de entradas y salidas.

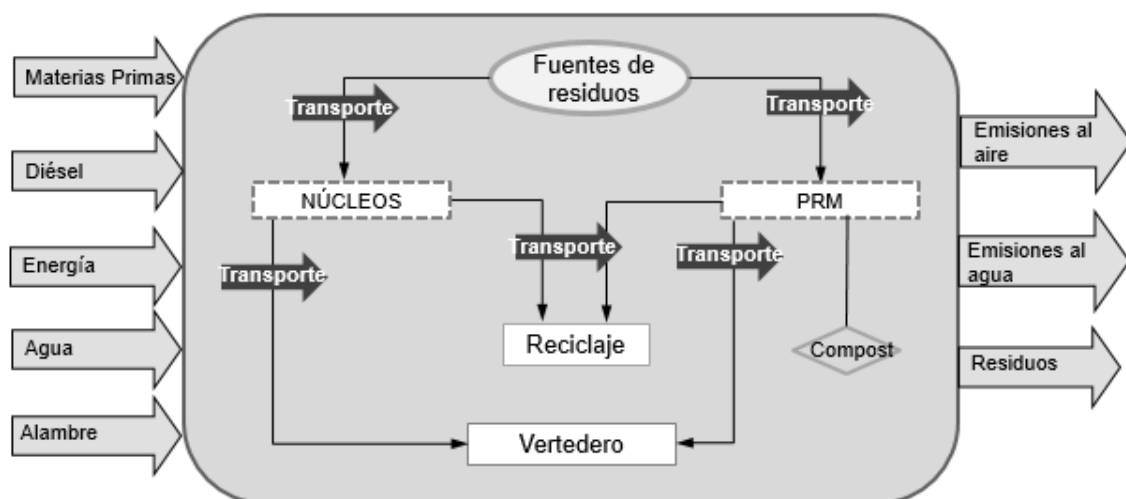


Figura 56. Entradas y salidas del Sistema de Gestión de Residuos de João Pessoa. Fuente: Propia

Cabe señalar que queda fuera del alcance de este estudio las infraestructuras necesarias para el desarrollo de cada etapa.



### 8.1.3. DEFINICIÓN DE LA UNIDAD FUNCIONAL

La unidad funcional general utilizada para evaluar el comportamiento ambiental del SGR en cada escenario es 1 tonelada de RSD gestionada en cada una de las etapas definidas en el sistema (recogida selectiva, recogida convencional, Núcleos, PRM, transportes intermedios, compostaje, vertedero, o valorización, entre otras) Los resultados de ACV obtenidos se calcularán pues en base a esta unidad funcional.

Ahora bien, para inventariar y modelar en el software de ACV cada una de las etapas del SGR, se utilizarán unidades funcionales propias de cada proceso unitario. En la Tabla 21 se muestra para cada etapa del sistema a que unidad funcional esta referenciada.

Etapas	Unidades Funcionales por Proceso Unitario	Unidad Funcional Global
ETAPA 1.1: Recogida Selectiva y transporte a los núcleos	1 Tonelada de residuos recogidos en la recogida selectiva	1 Tonelada de RSD gestionado en el SGR bajo estudio
ETAPA 1.2: Recogida Convencional y transporte a la PRM	1 Tonelada de residuos recogidos en la recogida convencional	
ETAPA 2: Unidad de clasificación de la recogida selectiva –Núcleos	1 Tonelada de residuos recogidos en la recogida selectiva	
ETAPA 3: Planta de Recuperación de Materiales (PRM)	1 Tonelada de residuos recogidos en la recogida convencional	
ETAPA 4.1: Transporte de los Núcleos a los Intermediarios	1 Tonelada de cada uno de los materiales reciclables separados en los Núcleos	
ETAPA 4.2: Transporte de la Planta de Recuperación de Materiales (PRM) a los intermediarios	1 Tonelada de cada uno de los materiales reciclables separados en la PRM	
ETAPA 4.3: Transporte de los intermediarios a las Plantas de Reciclaje	1 Tonelada de cada uno de los materiales separados en los Núcleos y en la PRM	
ETAPA 5.1: Planta de Reciclaje	1 Tonelada de cada uno de los materiales separados en los Núcleos y en la PRM	
ETAPA 5.2: Compostaje	1 Tonelada de materia orgánica compostada	
ETAPA 6: Disposición Final. Vertedero	1 Tonelada de cada uno de los materiales dispuestos en el vertedero	

Tabla 21. Unidades funcionales todo el sistema. Fuente: Propia

## 8.2. ETAPA II: INVENTARIO DEL CICLO DE VIDA

En este apartado se han recopilado todos los datos cuantitativos de las entradas y las salidas de materia y energía para cada una de las etapas del SGR correspondiente a cada uno de los escenarios propuestos, dejando fuera la infraestructura por estar fuera del alcance del estudio de ACV. Cada uno de estos datos de inventario está referido a la unidad funcional propia de cada proceso unitario, tal y como se ha explicado en el Apartado anterior.

Los datos utilizados en el ICV son datos primarios proporcionados por las propias fuentes de información y en los casos en los que los datos eran desconocidos se han utilizado datos procedentes de la literatura.

El inventario se ha dividido en 6 etapas, tal y como se muestra en la Figura 57:

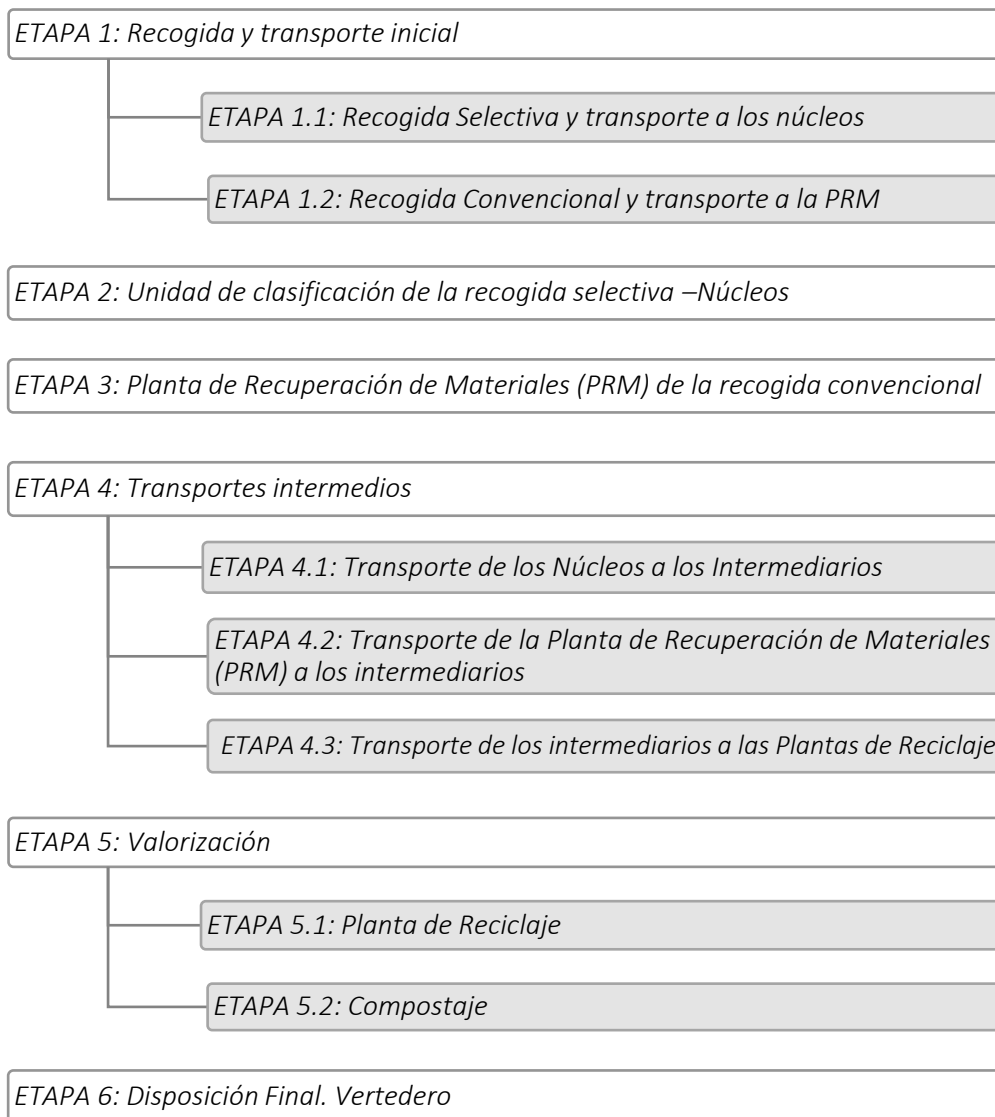


Figura 57. Etapas del inventario de ciclo de vida del ACV. Fuente: Propia.

## 8.2.1. DATOS DE INVENTARIO

### 8.2.1.1. ETAPA 1: RECOGIDA Y TRANSPORTE INICIAL

La Figura 58 muestra los flujos en la etapa de recogida y transporte inicial. El impacto ambiental producido en ella está asignado únicamente al consumo de diésel, dentro de esta etapa se consideran dos recogidas, la selectiva y la convencional. No se ha considerado el impacto que produce la fabricación del camión y también se han despreciado los contenedores instalados, ya que su número es muy pequeño (12 para toda la ciudad).

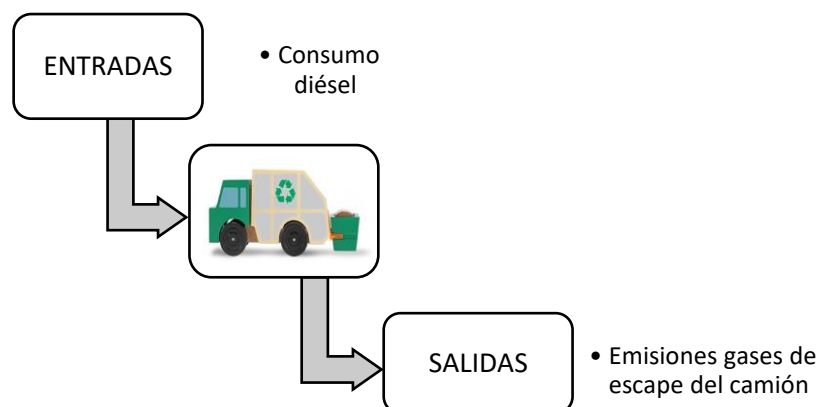


Figura 58. Flujos de entrada y salida de la Recogida Selectiva y transporte a los núcleos. Fuente: Propia.

Para cuantificar el consumo de diésel que realizado por los camiones de recogida selectiva y convencional se han realizado una serie de consideraciones que se explican a continuación.

#### Consumo de diésel

Para la recogida selectiva se considera que se utilizan camiones de tipo remolque con una capacidad de carga de 4 toneladas. El consumo de estos camiones es de 5 l/km en las rutas de recogida (V. Ibáñez-Forés et al., 2018). Por otro lado, en la recogida convencional se utilizan camiones compactadores con una capacidad de 16 toneladas y su consumo es de 0,33 l/km (V. Ibáñez-Forés et al., 2018).

Los cálculos realizados para estimar el consumo realizado por el camión para recoger una tonelada de residuos reciclables y mixtos se muestran en el ANEXO II y ANEXO III respectivamente. En la Tabla 22 se muestran los resultados de dichos consumos para cada uno de los escenarios propuestos.

Escenarios	Recogida Selectiva	Recogida Convencional
	Consumo por tonelada (l/Tn)	Consumo por tonelada (l/Tn)
Escenario BASE (E0) (S0; C0)	39,85	0,603
Escenario 1 (Smin; C0)	140,08	0,604
Escenario 2 (Smax; C0)	100,29	0,392
Escenario 3 (S0; Cmin)	39,85	0,603

Escenario 4 (S0; Cmax)	39,85	0,603
Escenario 5 (Smin; Cmin)	140,08	0,604
Escenario 6 (Smax; Cmax)	100,29	0,392
Escenario 7 (Smax; Cmin)	100,29	0,392
Escenario 8 (Smin; Cmax)	140,08	0,604

Tabla 22. Consumo de diésel por cada tonelada transportada de residuos en la recogida selectiva y en la recogida convencional para cada uno de los escenarios. Fuente: Propia

### 8.2.1.2. ETAPA 2: UNIDAD DE CLASIFICACIÓN DE LA RECOGIDA SELECTIVA – NÚCLEOS

El impacto ambiental producido en la unidad de clasificación está producido por los consumos energéticos y de materia prima que se realizan en estos núcleos. La Figura 59 muestra los flujos de esta etapa.

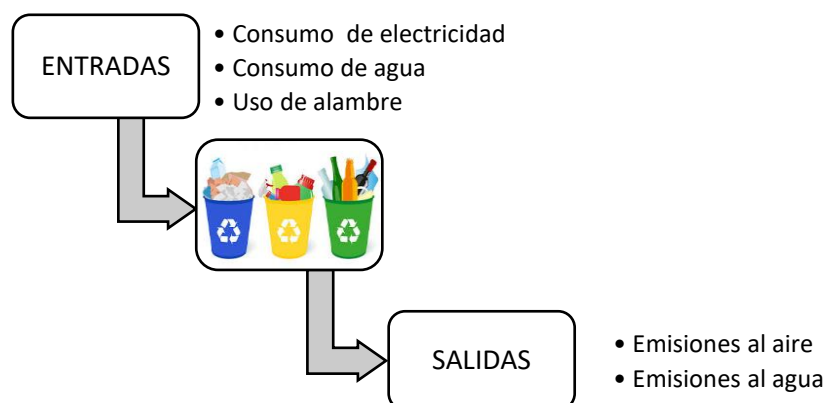


Figura 59. Flujos de entradas y salidas de los Núcleos. Fuente: Propia

#### Consumo de Electricidad y de Agua

El consumo de electricidad que se realiza en los núcleos se debe principalmente al uso de la luz y la prensa. Y el agua se trata de agua potabilizada apta para el consumo humano.

En la Tabla 23 se muestran las cantidades de energía y el agua consumidos en función de las toneladas procesadas.

Consumos de los Núcleos	Electricidad (KWh/Tn)	Agua (m3/Tn)
Barrio dos Estados	13,393	0,472
Barrio Caic	13,164	1,905
Barrio Cabo Branco	4,968	0,385
Barrio Bessa	8,301	0,766
Barrio Mangabeira	10,290	2,328
<b>Total João Pessoa</b>	<b>8,964</b>	<b>1,035</b>

Tabla 23. Consumo de electricidad y de agua por cada tonelada de residuos gestionada en los núcleos. Fuente: EMLUR

### Consumo de alambre

El consumo que se realiza de alambre deriva de su uso para enfardar los materiales reciclables una vez están separados para enviarlos a los intermediarios. La cantidad de alambre utilizado es de **0,85 kg por cada tonelada procesada** (P. Lima et al., 2019).

### 8.2.1.3. ETAPA 3: PLANTA DE RECUPERACIÓN DE MATERIALES (PRM) DE LA RECOGIDA CONVENCIONAL

El impacto ambiental producido en la Planta de Recuperación de Materiales se debe principalmente a los gastos energéticos y de materias primas que se realizan en la planta. La Figura 60 muestra los flujos de esta etapa.

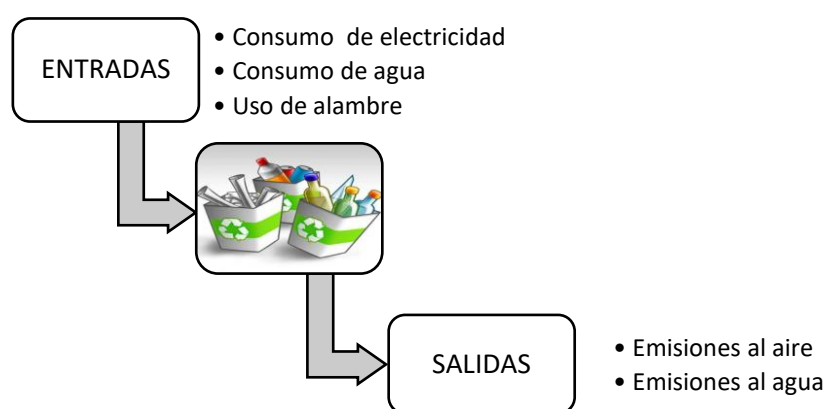


Figura 60. Flujos de entradas y salidas de la PRM. Fuente: Propia.

### Consumo de electricidad

La energía consumida en la Planta de Recuperación de Materiales se debe al uso de la luz y a la tecnología empleada en ella, por lo tanto, el consumo energético por tonelada variará en función del escenario propuesto, puesto que algunos de los escenarios incorporan mejoras tecnológicas que consumen electricidad a la vez que procesan cantidades diferentes de residuos (Ver Apartado 7.3.2).

En los escenarios en los que no se implementa ninguna mejora en la planta, la cantidad de energía consumida en **esta planta es de 45,878 kWh** por cada tonelada procesada (EMLUR., 2018).

En los escenarios en los que optimiza en la recuperación de materiales, se tiene que considerar los consumos del trómel y los dos electroimanes incorporados además de las cintas transportadoras y la prensa ya instaladas. El valor de la energía consumida en este nuevo proceso es de 40 kWh por cada tonelada de residuos procesados (Reichert, 2013).

A continuación, en la Tabla 24 se muestra un resumen del consumo eléctrico de la PRM para cada uno de los escenarios propuestos.

Escenarios	Electricidad (KWh/Tn)
Escenario BASE (E0) (S0; C0)	45,88
Escenario 1 (Smin; C0)	45,88
Escenario 2 (Smax; C0)	85,88
Escenario 3 (S0; Cmin)	85,88
Escenario 4 (S0; Cmax)	85,88
Escenario 5 (Smax; Cmax)	85,88
Escenario 6 (Smax; Cmin)	85,88
Escenario 7 (Smin; Cmax)	85,88

Tabla 24. Consumo de electricidad en la PMR en función de 1 Tn gestionada en esta planta.

Fuente: Propia.

### Consumo de agua

El agua consumida en esta planta proviene de un pozo, sin tratamiento previo. Dicha agua se utiliza para la limpieza de la planta o el consumo realizado los mismos trabajadores, por lo que el ratio de consumo se mantiene constante en todos los escenarios. El agua consumida en esta planta es de **1,073 m<sup>3</sup> por cada tonelada procesada** (EMLUR, 2018).

### Consumo de alambre

El gasto que se realiza del alambre es para enfardar los materiales reciclables una vez están separados para enviarlos a los intermediarios. La cantidad de alambre utilizado es de **0,85 kg por cada tonelada procesada** (EMLUR, 2019).

## 8.2.1.4. ETAPA 4: TRANSPORTES INTERMEDIOS

El impacto ambiental asociado a los diferentes transportes que se realizan hasta los intermediarios y las plantas de reciclaje se deben al uso de diésel, tal y como muestra la Figura 61. Los transportes que se incluyen en esta etapa son: el transporte de los Núcleos a los intermediarios, de la PRM a los intermediarios y de los intermediarios a la planta de reciclaje.

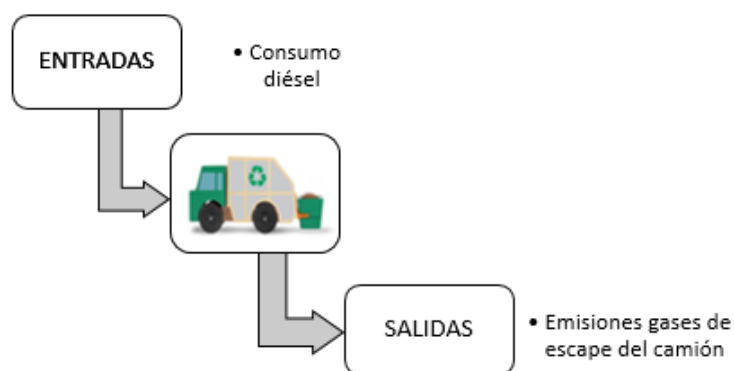


Figura 61. Flujos de entradas y salidas de los transportes intermedios. Fuente: Propia.

Para esta etapa de transporte se utilizan camiones de 11 toneladas de capacidad. Cada fracción de materiales valorizables se dirige a un intermediario diferente y a una planta de valorización diferente. Por lo tanto, los consumos realizados por el camión se han considerado en función de las toneladas de cada material por separado.

Los cálculos de estos consumos se han calculado en el ANEXO IV. En la Tabla 25 se detallan los resultados finales de estos consumos.

Materiales	Núcleos - Intermediarios	PRM - Intermediarios	Intermediarios – Planta Reciclaje
	Consumo por tonelada (l/Tn)	Consumo por tonelada (l/Tn)	Consumo por tonelada (l/Tn)
Papel	0,155	0,767	6,280
Plástico	0,168	0,784	0,554
Metal	0,438	0,670	4,280
Vidrio	0,308	0,835	4,245
Caucho	0,264	1,085	0,239

Tabla 25. Consumo de diésel por cada tonelada transportada de residuos durante los transportes intermedios para cada uno de los materiales reciclables. Fuente: Propia

### 8.2.1.5. ETAPA 5: Valorización

#### ETAPA 5.1: Planta de Reciclaje

El impacto ambiental que se realiza en la planta de reciclaje es producido por los gastos energéticos y de materia prima que se realizan en esta planta. La figura 62 muestra los flujos de esta etapa.

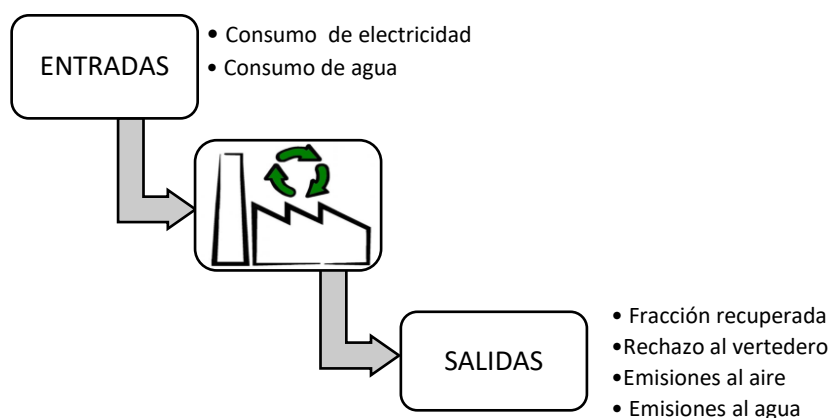


Figura 62. Flujos de entradas y salidas de la planta de reciclaje. Fuente: Propia.

En este apartado se ha supuesto que el reciclaje del caucho está considerado dentro del reciclaje del plástico.

### Consumo de electricidad

El consumo de electricidad que se realiza en las plantas de reciclaje de papel, plástico, metal se expone en la Tabla 26 en función de las toneladas tratadas de cada material.

Consumos de las Plantas Recicladoras	Electricidad (KWh/Tn)	Fuente
Papel	2083,33	(getraambiental.com, 2014)
Plástico	4190	(getraambiental.com, 2014)
Metal	1750	(M. Waldman, 2017)
Vidrio	1440	(S. Calderoni, 1997).

Tabla 26. Consumo de electricidad por cada tonelada de residuos gestionada en cada una de las plantas de reciclaje.  
Fuente Propia.

### Consumo de agua

La cantidad de agua consumida en estas plantas, se trata de agua de origen natural sin necesidad de tratamientos previos. La Tabla 27 se muestra los consumos de agua en función de las toneladas procesadas en cada planta recicladora.

Consumos de las Plantas Recicladoras	Agua (l/Tn)	Fuente
Papel	1666,67	(getraambiental.com, 2014)
Plástico	400	(getraambiental.com, 2014)
Metal	24000000	(M. Waldman, 2017)
Vidrio	20000	(S. Calderoni, 1997).

Tabla 27. Consumo de agua por cada tonelada de residuos gestionada en cada una de las plantas de reciclaje.  
Fuente: Propia.

### Fracción recuperada y rechazo al vertedero

En las plantas de reciclaje se debe tener en cuenta de que los materiales que finalmente son recuperados, se evita su producción como materia prima virgen. Para conocer la proporción de papel, plástico, vidrio o metal resultante después del proceso de reciclaje, es necesario conocer la eficiencia de recuperación de cada uno de los procesos, en el ANEXO V se muestran los cálculos realizados para llegar a esta fracción de recuperación.

Los materiales que no son recuperados en las plantas de reciclaje son depositados en el vertedero generando un impacto ambiental, por lo tanto, se debe tener en cuenta esta proporción en la definición del inventario.

En la Tabla 28 se muestran estas dos fracciones; la fracción recuperada que consigue transformarse en materia prima y el rechazo que se envía al vertedero para cada una de las plantas de reciclaje.



Plantas Recicladoras	Fracción recuperada	Fracción de Rechazo Vertedero
Papel	0,812	0,188
Plástico	0,648	0,352
Metal	0,90	0,10
Vidrio	0,72	0,28

Tabla 28. Fracción recuperada de los materiales recuperables y fracción rechazada enviada al vertedero en cada una de las plantas de reciclaje. Fuente: Propia

## ETAPA 5.2: Compostaje

El impacto ambiental que debido a la implantación de la etapa de compostaje se debe a los efectos de la descomposición de la materia orgánica. La Figura 63 muestra los flujos de esta etapa.

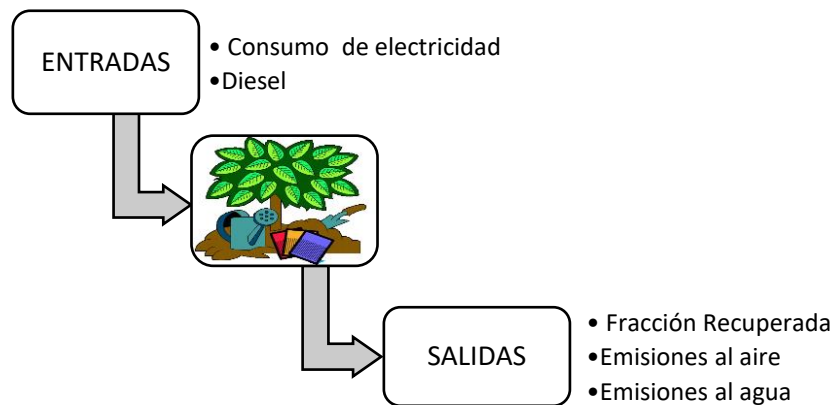


Figura 63. Flujos de entradas y salidas en el proceso de compostaje. Fuente: Propia.

### Fracción recuperada

En el proceso de compostaje se debe tener en cuenta de que con la materia orgánica que finalmente es recuperada, se evita su producción como materia prima virgen. La pérdida de masa que se produce durante el proceso de compostaje es del 50% (Reichert, 2013), por lo que **el 50% de lo que se composta se evita producir como materia prima virgen.**

### Consumo de diésel

Para el manejo y la deposición de la materia prima en las pilas de compostaje se utiliza una mini cargadora que consume **0,89 litros por cada tonelada depositada** (Gomes et al., 2015).

### Emisiones al agua y al aire

Con la descomposición de la materia orgánica se producen el lixiviado y las emisiones de gases contaminantes, ambos deben ser consideradas en el impacto ambiental de esta etapa. **El valor del lixiviado es de 0,15 m³ por tonelada compostada** y **el valor de las emisiones de gases alcanza los 100 m³ por cada tonelada compostada** (White et al., 2012). La composición de los lixiviados y de los gases se encuentra en el ANEXO VI i en el ANEXO VIII respectivamente.

### 8.2.1.6. ETAPA 6: Disposición Final. Vertedero

El impacto ambiental que se produce por la deposición de los residuos en el vertedero se debe a los consumos energéticos que se producen en él y por la huella que los residuos dejan al descomponerse. La Figura 64 muestra los flujos de esta etapa.

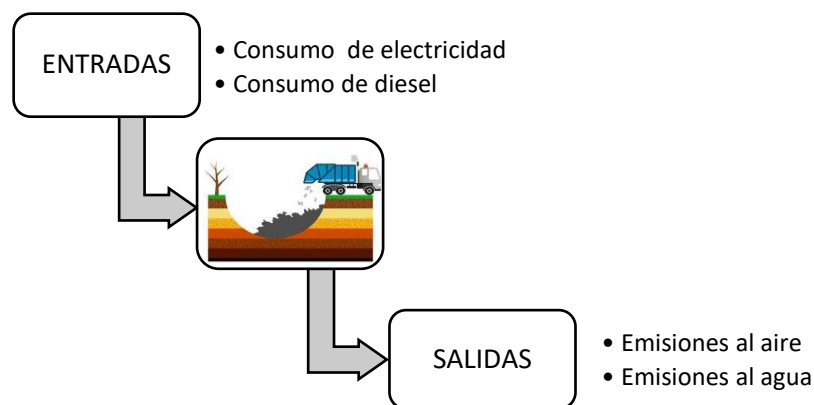


Figura 64. Flujos de entradas y salidas en el vertedero. Fuente: Propia.

#### Consumo de electricidad

La energía consumida en el vertedero se debe a la electricidad del departamento de administración que se encuentra allí. La cantidad de energía consumida en esta etapa es de **0,041 KWh por cada tonelada depositada** (EMLUR, 2018).

#### Consumo diésel

Para el manejo y la deposición de los desechos en el vertedero se utilizan tractores que consumen **0,8 litros por cada tonelada depositada** (Reichert, 2013).

#### Emisiones al agua y al aire

Por la descomposición de los residuos en el vertedero se producen lixiviados y emisiones de gases contaminantes, ambos deben ser considerados en el impacto ambiental de esta etapa. El valor de estas emisiones se muestra en la Tabla 29, en función de la materia que se descompone.

Material en descomposición	Generación de lixiviados (m³/Tn)	Generación de gases (m³/Tn)
Materia Orgánica	0,15	250
Papel	0,15	250
Plástico	0,15	0
Metal	0,15	0
Vidrio	0,15	0
Resto	0,15	0

Tabla 29. Generación de lixiviados y gases de vertedero por cada tonelada depositada. Fuente: (White et al., 2012)

La composición del lixiviado y de los gases contaminantes se encuentra en el ANEXO VII y el ANEXO VIII respectivamente.

## 8.2.2. MODELO DE INVENTARIO

Las bases de datos públicas y comerciales proporcionan datos de proceso bien documentados para miles de productos, de forma que han sido utilizadas como fuente de información y ha servido de gran ayuda para en el cálculo del impacto ambiental. En este caso la base de datos utilizada para el estudio es Ecoinvent 3.5 (2018).

Las materias primas que se utilizan en el sistema de gestión de residuos que abarca este proyecto son: el diésel consumido en los transportes, el alambre utilizado para enfardar los materiales reciclados y por último la electricidad y el agua consumida en las plantas. En la Tabla 30 se definen los datos de la biblioteca de Ecoinvent 3.5 (2018) para las materias primas utilizadas.

DIÉSEL	
BASE DE DATOS ECOINVENT	ETAPAS DONDE SE UTILIZA
Transport, freight, lorry 3,5-7,5 metric tonnes	Etapa 1.1: Recogida Selectiva
Transport, freight, lorry 7,5 -16 metric tonnes	Etapa 1.2: Recogida Convencional
Transport, freight, lorry 16 - 32 metric tonnes	Etapa 4: Transportes intermedios
Diesel burned in agricultural machinery	Etapa 6: Vertedero
ALAMBRE	
BASE DE DATOS ECOINVENT	ETAPAS DONDE SE UTILIZA
Steel wire rod	Etapa 2: Núcleos Etapa 3: PRM
ELECTRICIDAD	
BASE DE DATOS ECOINVENT	ETAPAS DONDE SE UTILIZA
Electricity, low voltaje, Brazil	Etapa 2: Núcleos Etapa 3: PRM Etapa 5.1 Planta de Reciclaje Etapa 5.2: Proceso de Compostaje Etapa 6: Vertedero
AGUA	
BASE DE DATOS ECOINVENT	ETAPAS DONDE SE UTILIZA
Water, natural origin, Brazil	Etapa 3: PRM Etapa 5.1 Planta de Reciclaje
Tap Water	Etapa 2: Núcleos
PRODUCTOS EVITADOS	
BASE DE DATOS ECOINVENT	ETAPAS DONDE SE UTILIZA
Paper, newsprint. Paper production, newsprint, virgin. Rest of the World.	Etapa 5.1 Planta de Reciclaje (Papel)
Polyethylene, high density, granulate. Production. Rest of the World.	Etapa 5.1 Planta de Reciclaje (Plástico)
Pig iron. Production. Global	Etapa 5.1 Planta de Reciclaje (Metal)
Packaging glass, green. Packaging glass production, Green, without cullet. Global	Etapa 5.1 Planta de Reciclaje (Vidrio)
Compost. Global	Etapa 5.2: Proceso de Compostaje

Tabla 30. Datos utilizados para el ACV de la base de datos de Ecoinvent 3.5 (2018).

Fuente: Propia.

### 8.2.3. ESTUDIO DE LA REPRESENTATIVIDAD Y CALIDAD DE LOS DATOS

#### 8.2.3.1. *Representatividad de los datos a nivel nacional*

Para poder evaluar cuál ha sido la representatividad de los datos empleados en el inventario para la propuesta de los escenarios alternativos, se han estudiado los Sistemas de Gestión de Residuos de las capitales con tasas de reciclabilidad más altos que en João Pessoa. Estas ciudades son Brasilia, Goiânia, Florianópolis y Porto Alegre.

A partir de los datos de la ciudad de Brasilia se han confeccionado los escenarios del presente trabajo. Teniendo en cuenta los porcentajes de los flujos que siguen los residuos en su sistema de gestión.

Además, en todo momento se ha tratado de utilizar fuentes de información del país, tanto en los datos utilizados de la base de datos de Ecoinvent 3.5 (2018), como en los datos extraídos de la literatura.

#### 8.2.3.2. *Calidad de los datos*

Cualquier ACV que se realice requiere la utilización de un gran número de datos individuales procedentes de diferentes fuentes. Por tanto, la calidad y credibilidad de los resultados del estudio dependerán en gran medida de la calidad de los datos tomados como partida.

Tal y como recomienda la metodología propuesta por la norma ISO 14040-44 (2006), tras realizar un ICV se ha valorado la calidad del mismo analizando diferentes parámetros.

Todos los datos recogidos corresponden al periodo de entre 2016 y 2018. Han sido recopilados directamente de la fuente, es decir, de empresa encargada de la limpieza municipal urbana; EMLUR. En el proceso de recopilación de la información se han tenido en cuenta los indicadores de calidad mostrados en la Tabla 31:

INDICADORES DE CALIDAD	
Fuente de información:	Todos los datos de João Pessoa han sido proporcionados directamente por la empresa encargada de la limpieza urbana, es decir, son datos primarios.
	En los escenarios propuestos se han utilizado datos de otras ciudades Brasileñas o datos extraídos de la literatura, siempre teniendo en cuenta que fueran de fuentes Brasileñas.
	Por último, los datos utilizados de la base de datos de SimaPro, Ecoinvent 3.5 (2018), se ha procurado que sean de origen Brasileño.
Método de recogida de datos:	Los datos del SGR de João Pessoa se han obtenido directamente de la fuente de origen, han sido facilitados por la empresa de limpieza urbana.

Edad de los datos:	<p>Todos los datos utilizados para el SGR de João Pessoa pertenecen al periodo 2016 – 2018.</p> <p>Los datos procedentes de la literatura son bastante actuales, el dato más antiguo se trata del 2009.</p>
Geografía:	<p>Todos los datos del SGR de João Pessoa, proviene de fuentes primarias.</p> <p>Los demás datos utilizados, tanto de la literatura como de la base de datos Ecoinvent 3.5 (2018) se ha procurado que sean de fuentes Brasileñas.</p>
Tecnología:	<p>Toda la tecnología propuesta se trata de tecnología actualmente en utilizada en los SGR de Brasil.</p>

*Tabla 31. Indicadores de calidad. Fuente: Propia.*

### 8.3. ETAPA III: EVALUACIÓN DEL IMPACTO DEL CICLO DE VIDA (EICV)

En este apartado se evalúa la contribución a diferentes impactos ambientales de cada una de las etapas y procesos unitarios que intervienen en los Sistemas de Gestión de Residuos de los escenarios propuestos. La finalidad es detectar si las mejoras aplicadas son beneficiosas para el medio ambiente o si por lo contrario han contribuido de manera perjudicial.

Los datos de inventario, correspondientes a cada escenario propuesto, han sido modelados mediante el programa SimaPro 8.3 (2018).

Siguiendo la metodología propuesta por la norma ISO 14040-44 (2006), se han obtenido los indicadores ambientales para las diferentes categorías de impacto estudiadas, mostradas en la Tabla 32:

Categoría de impacto	Unidad
Acidificación	<i>kg de SO<sub>2</sub> eq</i>
Eutrofización	<i>kg de PO<sub>4</sub><sup>-3</sup> eq</i>
Efecto invernadero	<i>kg de CO<sub>2</sub> eq</i>
Oxidación fotoquímica (Smog)	<i>kg de C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> eq</i>
Destrucción de la capa de ozono	<i>kg de CFC-11 eq</i>

*Tabla 32. Categorías de impacto. Fuente: Propia*

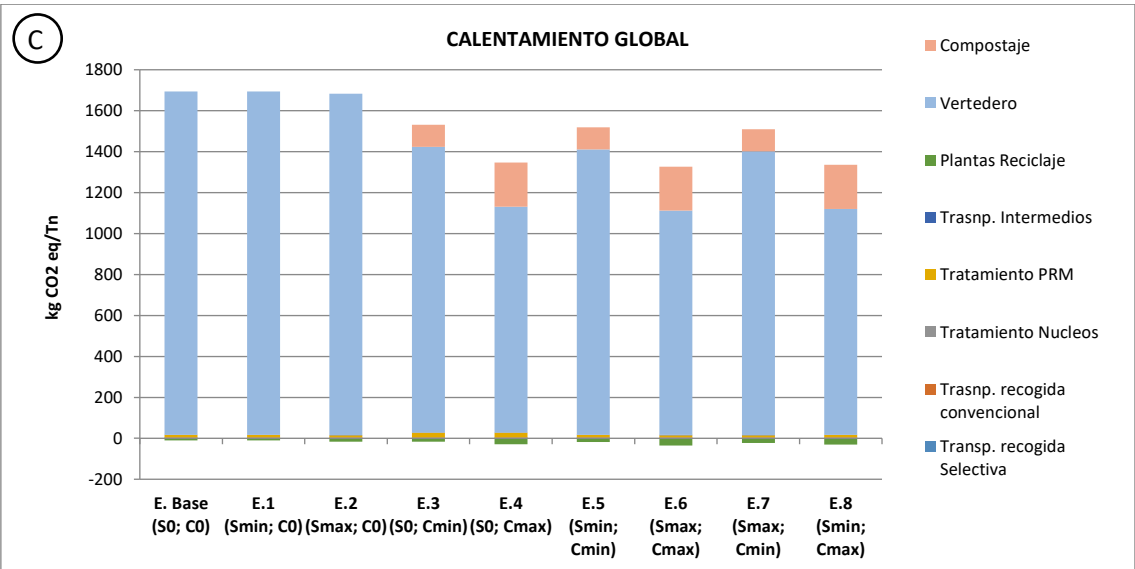
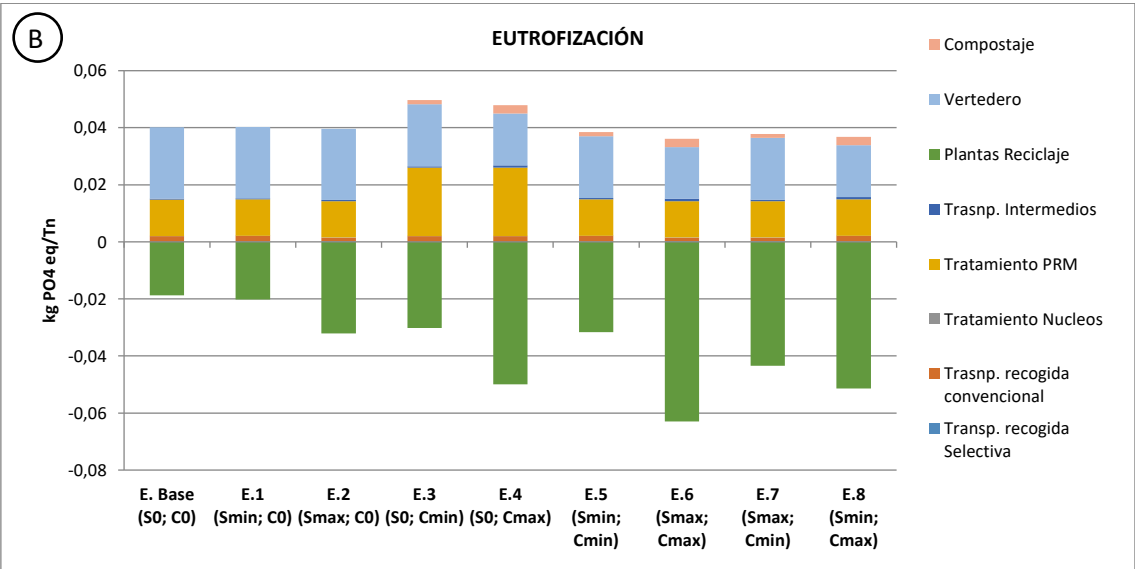
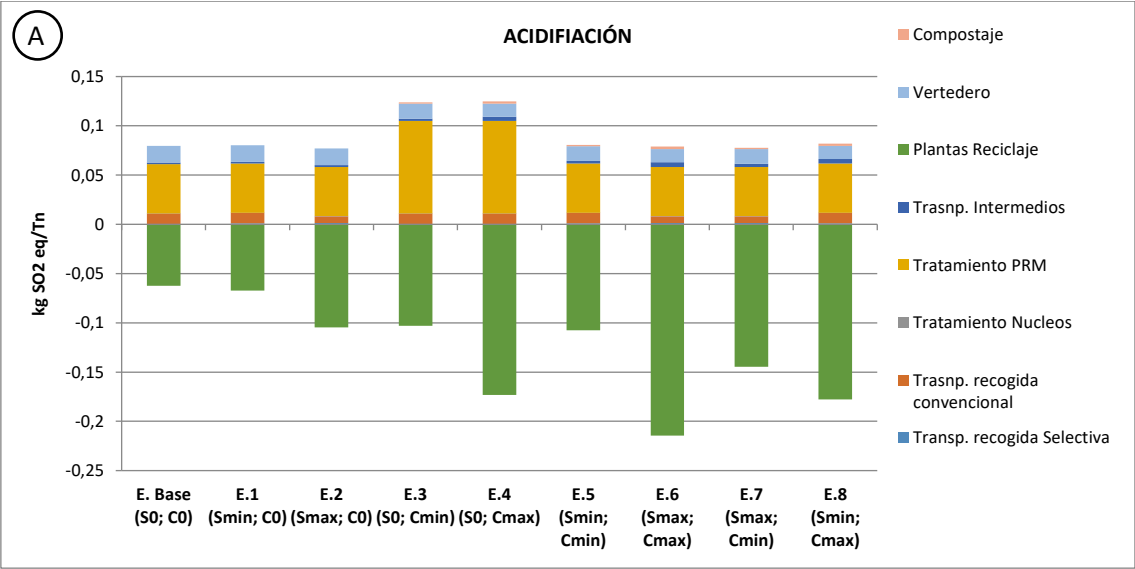
Los factores de caracterización aplicados a cada categoría de impacto son los propuestos por el método CML (Guinee, 2002).

#### 8.3.1. ANÁLISIS DEL IMPACTO ASOCIADO A LAS ETAPAS DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS

En primer lugar, se ha realizado un análisis para evaluar la influencia que las diferentes etapas del sistema de gestión de residuos tienen sobre cada categoría de impacto. Con esta información será posible conocer cuáles son las etapas más críticas desde el punto de vista ambiental.

A continuación, se procede a la evaluación de cada una de las categorías de impacto, diferenciando la contribución de cada una de las etapas definidas en el Apartado 8.2.

Primero que todo se muestran los gráficos de todas las categorías de impacto: Acidificación (Figura 65.a), Eutrofización (Figura 65.b), Calentamiento Global (Figura 65.c), Oxidación Fotoquímica (Figura 65.d) y Destrucción de la Capa de Ozono (Figura 65.e).



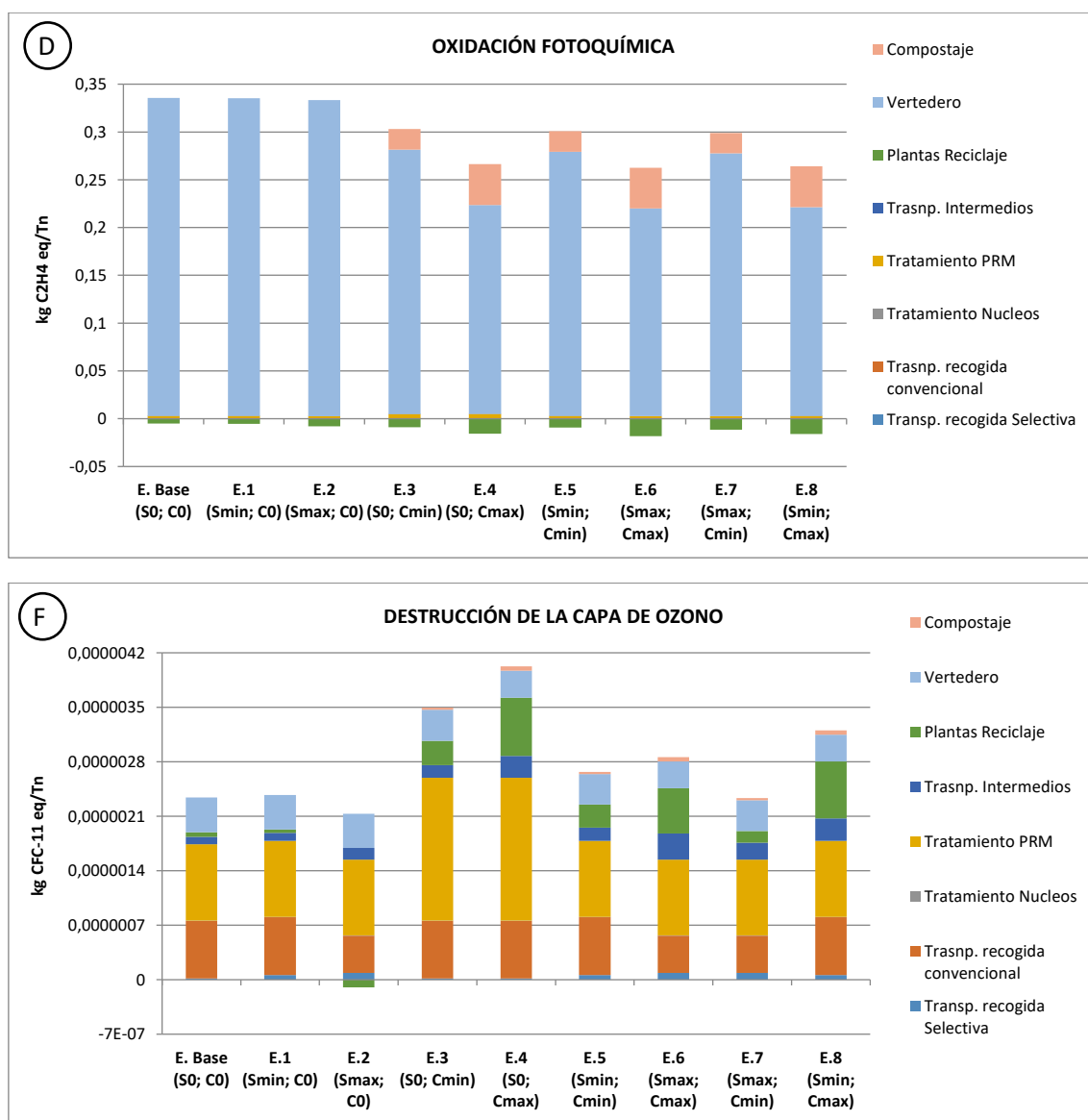


Figura 65. Impacto asociado a las etapas del sistema: a) Acidificación, b) Eutrofización, c) Calentamiento Global, d) Oxidación Fotoquímica y e) Destrucción de la Capa de Ozono (Datos por Unidad Funcional Global). Fuente: Propia

La Planta de Recuperación de Materiales contribuye significativamente al incremento de los impactos ambientales como la Acidificación, la Eutrofización y la Destrucción de la Capa de Ozono. Esto es debido al elevado consumo de electricidad que se produce en esta planta, derivado de las grandes cantidades de residuos que se gestionan allí a través de equipamiento tecnológico de gran consumo (cintas transportadoras, trómel, etc.). En los núcleos también se consume electricidad, aunque en menor medida.

Cabe destacar que, en Brasil, las principales fuentes de energía son no renovables, los combustibles fósiles implican el 42 % de la energía producida en el país (Empresa de Pesquisa Energética, 2018). Además, dichos combustibles contribuyen a la emisión de sustancias gaseosas como de dióxido de azufre, óxidos de nitrógeno, CO<sub>2</sub> entre otras, que contribuyen a la Acidificación, Eutrofización y a la Destrucción de la capa de Ozono.

Por otro lado, el vertedero es la etapa que contribuye principalmente al aumento de la Oxidación Fotoquímica, la Destrucción de la Capa de Ozono y en la Eutrofización. El motivo por el que el



vertedero tiene una gran carga negativa al impacto ambiental es, principalmente, la producción de lixiviados y gases contaminantes, los cuales contribuyen significativamente a dicho impactos ambientales. Con el compostaje también ocurre lo mismo, aunque en su caso, el impacto ambiental es mucho menor, tal y como muestra la Figura 65.b la Figura 65.c y la Figura 65.d.

La diferencia en la contribución al impacto ambiental existente entre la etapa de compostaje en comparación con la del vertedero se debe a diferentes factores:

La cantidad de materia orgánica descompuesta en este proceso es mucho menor que en el vertedero. Puesto que en el mejor de los casos, en el compostaje la materia orgánica representa el 18% y en el vertedero el 31% de todos los RSD gestionados.

Con el compostaje se introduce una carga evitada, es decir, se evita generar el impacto ambiental asociado a la producción de fertilizantes.

Otra etapa a destacar es la del reciclaje, esta es la única etapa beneficiosa en los impactos ambientales en todas las categorías de impacto, puesto que aporta unos ahorros netos muy significativos en materia de impacto ambiental. El motivo por lo que se considera un impacto positivo es porque al producir materia prima secundaria, es decir, generada a partir de materiales reciclables, se evita el consumo o producción de la materia virgen y, consecuentemente, se evita también emitir a la atmosfera una gran cantidad de emisiones contaminantes.

En la Acidificación y Eutrofización estas cargas positivas consiguen contrarrestar los efectos nocivos de los demás contaminantes asociados a cada etapa del SGR bajo estudio, en la mayoría de los escenarios. En el caso de Calentamiento Global y de la Oxidación Fotoquímica estas cargas positivas son muy pequeñas, por lo que no llegan a compensar los efectos nocivos del vertedero y del compostaje.

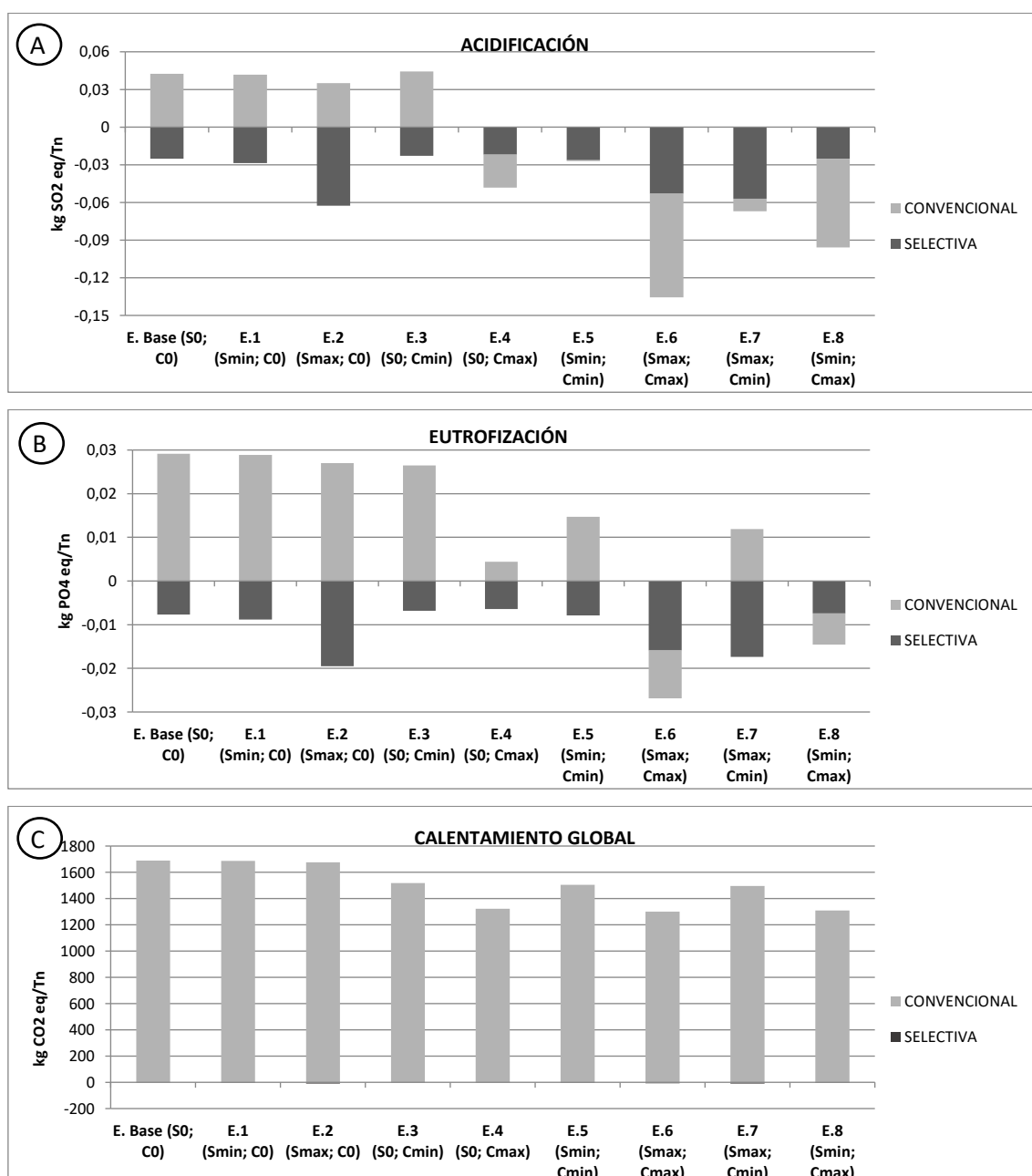
Por último, cabe señalar como en la categoría de impacto de Destrucción de la Capa de Ozono los impactos que genera el reciclaje son perjudiciales para el medioambiente debido al impacto que también generan dichas plantas (consumos de luz, agua, diésel, etc.).

Además, los diferentes transportes que se realizan durante la gestión de los residuos también tienen un peso importante sobre todo en las categorías de impacto como la Destrucción de la Capa de Ozono, la Acidificación y la Eutrofización. El motivo es la emisión de gases contaminantes como el CO<sub>2</sub>, o los óxidos de azufre a la atmosfera derivados de la combustión de diésel.

### 8.3.2. ANÁLISIS DEL IMPACTO ASOCIADO AL FLUJO DE MATERIALES RECOGIDOS MEDIANTE RECOGIDA SELECTIVA VS. RECOGIDA CONVENCIONAL

En las siguientes graficas se muestra diferenciado el impacto ambiental asociado a todo el ciclo de vida de los residuos que se recogen inicialmente de manera selectiva, desde que se genera el residuo en los hogares, hasta que se valorizan mediante el reciclaje. Frente a los que se recogen de manera convencional, desde que se recogen en los hogares hasta que reciclan, compostan o se depositan en el vertedero.

A continuación, la Figura 66 muestra el impacto ambiental de cada escenario para cada una de las categorías de impacto bajo estudio (ver Tabla 32), diferenciando en cada caso el asociado a los residuos “selectivos” de los convencionales.



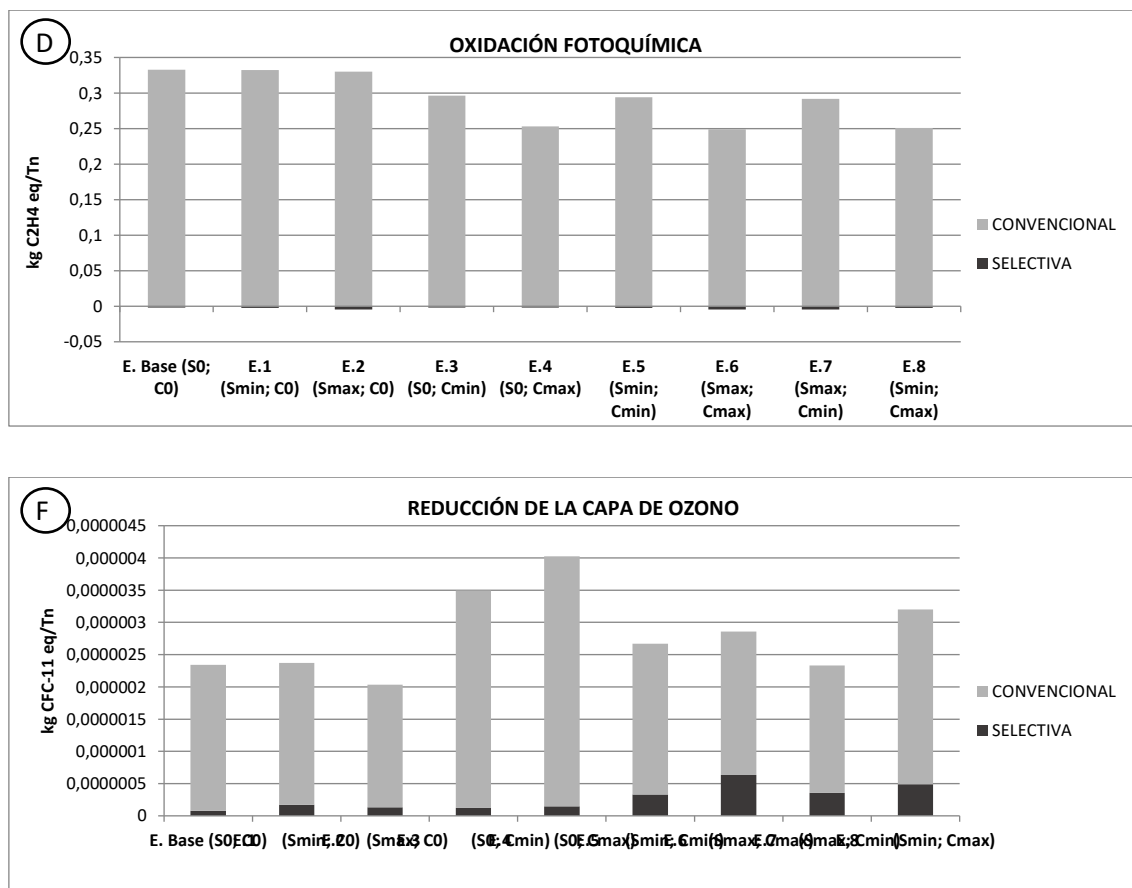


Figura 66. Categorías de Impacto selectiva vs. Convencional: a) Acidificación, b) Eutrofización, c) Calentamiento Global, d) Oxidación Fotoquímica y e) Destrucción de la Capa de Ozono (Datos por Unidad Funcional Global). Fuente: Propia

En todas las categorías de impacto se ve como el camino de los residuos recogidos convencionalmente contribuye en mayor medida a los impactos ambientales, observando una diferencia muy significativa al camino que realizan los residuos recogidos “selectivamente”.

Por lo tanto, se concluye que recoger residuos de forma selectiva contribuye de forma más favorable al impacto medioambiental que la recogida convencional, es decir, que recoger los residuos mezclados y separarlos en la Planta de Recuperación de materiales.

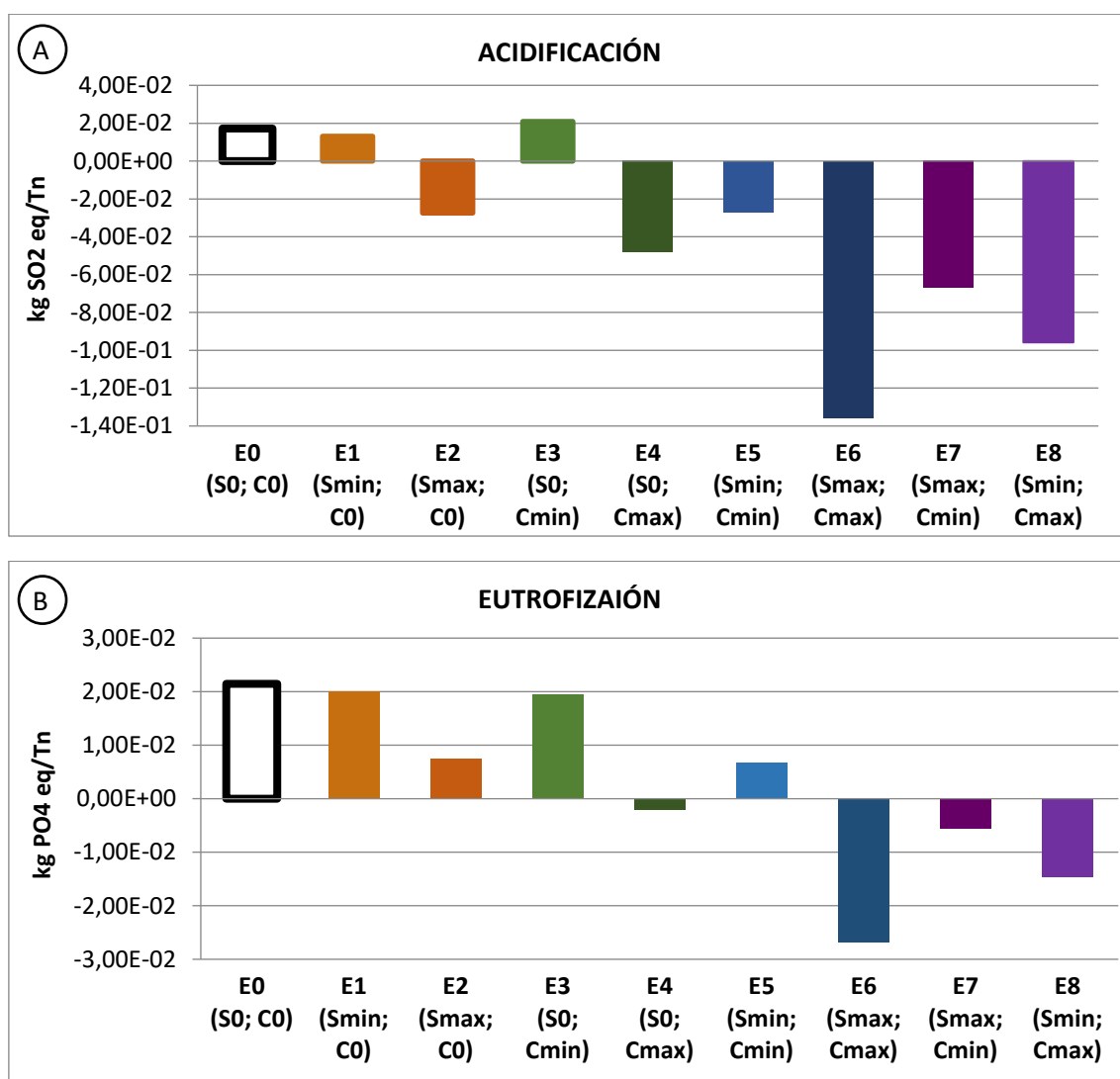
La etapa determinante a este resultado la del vertedero, los residuos que no se pueden recuperar y terminan depositados ahí contribuyen nocivamente en el medio ambiente por la descomposición de la materia orgánica y la emisión de sustancias contaminantes.

### 8.3.3. ANÁLISIS COMPARATIVO DEL IMPACTO DE LOS ESCENARIOS PROPUESTOS

En este apartado se calculan las contribuciones netas totales que cada uno de los escenarios aporta a cada una de las categorías de impacto. Estos resultados se representan gráficamente mediante unos diagramas de barras de forma que se pueda extraer fácilmente cual es el escenario óptimo para cada categoría de impacto (Ver Figura 67).

Se debe tener en cuenta que los valores en los que la categoría de impacto sean negativos, se traduce en que el impacto es positivo, es decir, que los efectos nocivos que el SGR tienen con el medio ambiente son mitigados por alguna o algunas etapas del proceso. Por lo que el Escenario con un valor negativo más alto será el óptimo.

De manera opuesta ocurre con los valores en los que la categoría de impacto sea positiva, el impacto ambiental en ese caso será negativo, es decir los efectos nocivos del SGR en el medio ambiente no habrán podido ser contrarrestados con las medidas empleadas.



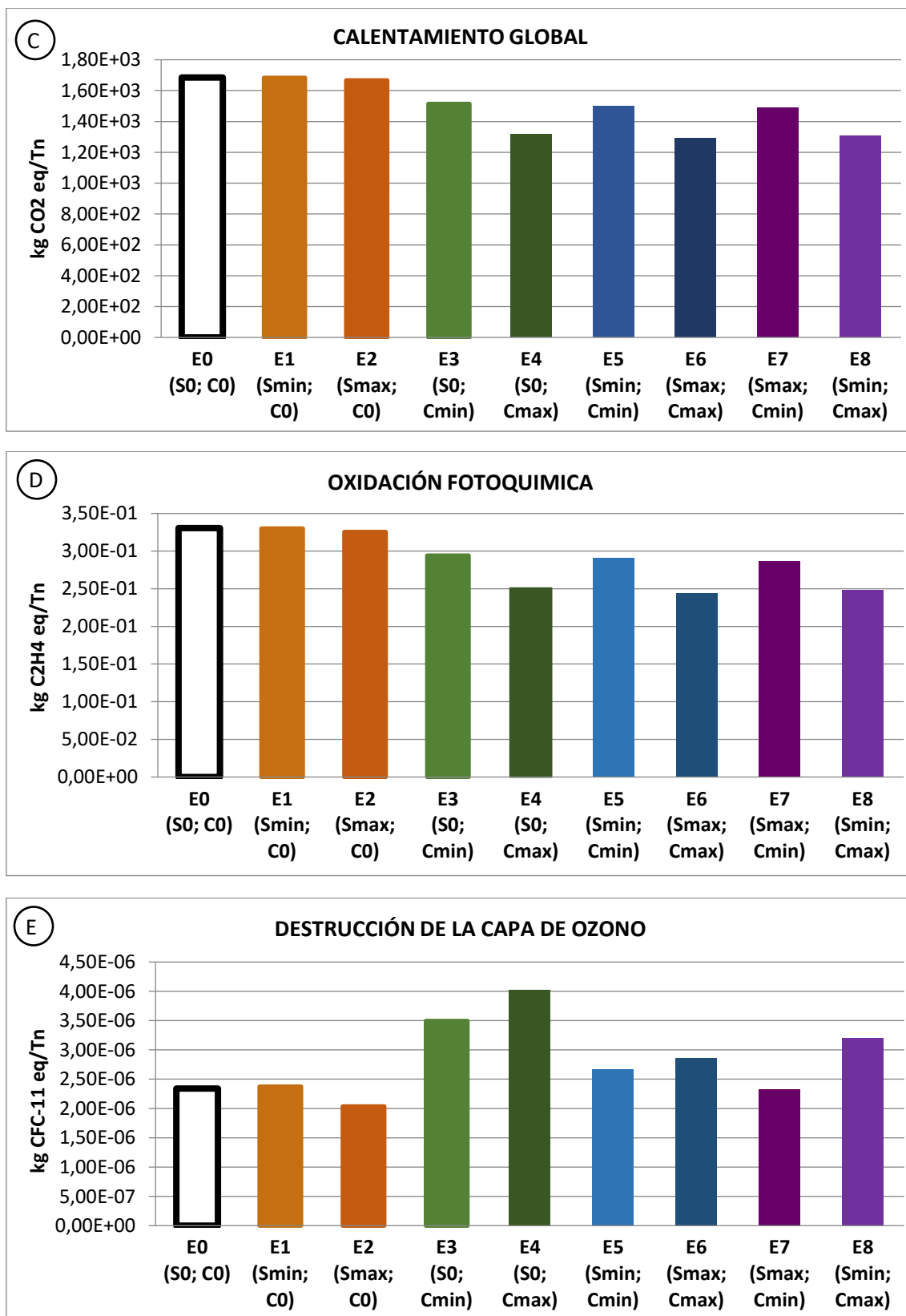


Figura 67. Categorías de Impacto: a) Acidificación, b) Eutrofización, c) Calentamiento Global, d) Oxidación Fotoquímica y e) Destrucción de la Capa de Ozono (Datos por Unidad Funcional Global). Fuente: Propia

La Primera observación que se puede realizar tras el análisis es que en la Acidificación, Eutrofización, Calentamiento Global y Oxidación Fotoquímica los resultados de las etapas propuestas son ambientalmente mejores que el escenario BASE.

Además en todas estas categorías de impacto **el escenario óptimo** se trata del **Escenario 6**. En él, todas las mejoras introducidas se implementan con el máximo valor y esto provoca que tenga los mejores resultados de reciclabilidad y por lo tanto, una mayor reducción de los residuos en el vertedero.

En la Acidificación y Eutrofización se ve como en muchos escenarios propuestos como los Escenarios 5, 6, 7 y 8 las cargas positivas debidas al reciclaje de los materiales compensan a las negativas producidas por las demás etapas. En el caso de los escenarios en los que los valores no son positivos es porque la etapa del reciclaje no llega a compensar el efecto nocivo de las otras etapas, esto es debido a que tienen peores ratios de reciclaje.

También se observa como cuando se optimiza la PRM y se introduce el compostaje la contribución al impacto ambiental se mejora más que con la introducción de la recogida selectiva. Esto es debido a que el porcentaje recuperado de materiales reciclables en la PRM, una vez optimizada, es mayor al recogido “selectivamente”. Pero es necesario combinar las tres propuestas para que los resultados sean excelentes como es el caso del Escenario 6.

En el caso del Calentamiento Global y la Oxidación Fotoquímica todos los escenarios propuestos tienen mejores resultados que el Escenario BASE, aun así los valores son negativos, esto se traduce en que todos contribuyen de forma perjudicial a estas categorías de impacto.

En ambas categorías de impacto, las mejoras implementadas con menor contribución a estos impactos ambientales son la optimización de la PRM y la introducción al compostaje. Se ve como en los escenarios en los que estas mejoras están al máximo, se obtienen mejores resultados que optimizando la recogida selectiva en su máximo valor.

Esto es debido a que la etapa que más contribuye a estas categorías de impacto es la descomposición de la materia en el vertedero (Ver Figura 65.c y 65.d). Por lo que al introducir el compostaje, se reduce mucho más la cantidad de materia orgánica en el vertedero. Aunque otra vez la combinación de las 3 mejoras conjuntamente da los mejores resultados (Escenario 6).

El primer aspecto a considerar en la última categoría de impacto analizada, es que con la excepción de los Escenarios 2 y 7, el resto contribuye más a la destrucción de la capa de ozono que el Escenario BASE. Además, los valores obtenidos vuelven a ser positivos, por lo que el SGR contribuye perjudicialmente a esta categoría de impacto (Ver Figura 67.e). En escenario más favorable es el Escenario 2, en el cual se aplica la mejora de la recogida selectiva en su valor máximo pero no se introduce el compostaje.

En esta categoría de impacto se puede ver como la optimización de la recogida selectiva tiene un mejor impacto que la optimización de la PRM y la introducción al compostaje. Por esta razón, los Escenarios 2 y 7 obtienen los mejores resultados y además menor impacto que el escenario BASE). En estos dos escenarios se aplica la recogida selectiva al máximo valor y o bien no se introduce ninguna mejora en la PRM y el compostaje (Escenario 2) o se introduce con un valor mínimo (Escenario 7).

### 8.3.4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

De acuerdo a las recomendaciones de la norma ISO 14040-44 (2006), a continuación, se realiza un análisis de sensibilidad para evaluar cómo influye el método aplicado en los resultados del estudio. En este método los resultados para cada categoría de impacto se agrupan hasta obtener un único valor de impacto ambiental.

Para ello, se obtienen indicadores ambientales a partir de la aplicación de varios métodos de evaluación del impacto de tipología “end-point”: El Eco-Indicador’99 (Goedkoop and Spriensma, 2000) y el método EPS2000 (Steen, 1999).

Cabe señalar que, el Eco-Indicador 99 se aplica bajo la perspectiva jerárquica, la cual evalúa el impacto total (en MPt) a partir de la ponderación de tres categorías de daño: Salud Humana, Calidad del Ecosistema y Agotamiento de los Recursos.

Y por último, el método EPS2000 calcula el impacto total (en Pt) a partir de la ponderación igualitaria de cuatro categorías de daño (Salud Humana, Biodiversidad, Capacidad de Producción de los Ecosistemas y Agotamiento de Recursos Abióticos).

Los resultados obtenidos mediante el método Eco-Indicador 99 se muestran en la Tabla 33, donde se desglosan la ponderación de las cuatro categorías de impacto y en la Figura 68 se muestra un diagrama de barras con la única categoría de impacto ambiental obtenida.

Eco-Indicador 99	E. BASE (S0; C0)	E.1 (Smin; C0)	E.2 (Smax; C0)	E.3 (S0; Smin)	E.4 (S0; Cmax)	E.5 (Smin; Cmin)	E.6 (Smax; Cmax)	E.7 (Smax; Cmin)	E.8 (Smin; Cmax)
Salud Humana (Pt /Tn)	9,20	9,13	8,55	8,07	6,10	7,62	5,10	7,05	5,66
Calidad del Ecosistema (Pt /Tn)	-0,12	-0,13	-0,25	-0,22	-0,45	-0,27	-0,61	-0,39	-0,50
Agotamiento delos Recursos (Pt /Tn)	-0,04	-0,07	-0,54	-0,70	-2,77	-1,27	-3,78	-1,73	-3,34
<b>Total (Pt /Tn)</b>	<b>9,034</b>	<b>8,929</b>	<b>7,755</b>	<b>7,148</b>	<b>2,882</b>	<b>6,085</b>	<b>0,705</b>	<b>4,936</b>	<b>1,826</b>

Tabla 33. Categorías de impacto del método Eco-Indicador 99. Fuente: Propia.

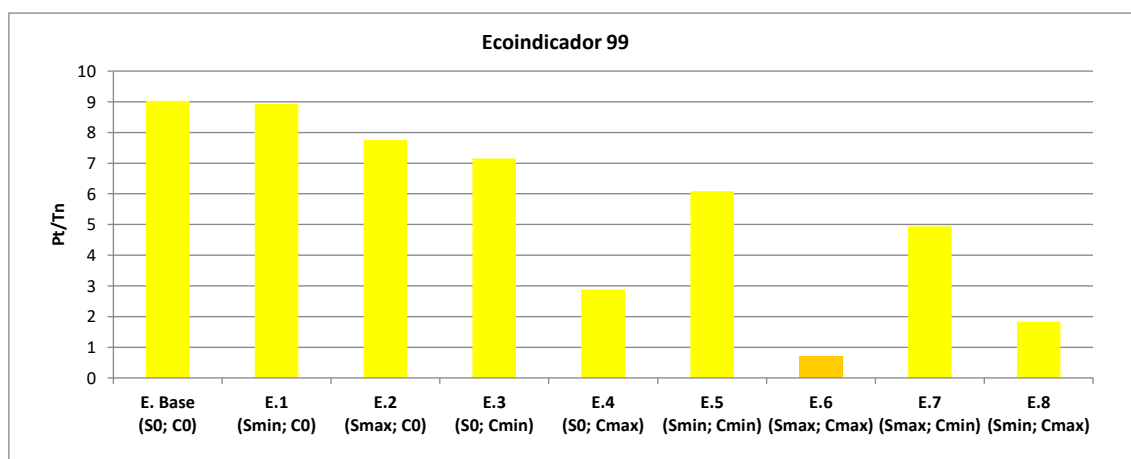


Figura 68. Único impacto ambiental calculado mediante el Eco-Indicador 99. Fuente: Propia

Los resultados obtenidos mediante el método EPS 2000 se muestran en la Tabla 34, donde se desglosan la ponderación de las cuatro categorías de impacto y en la Figura 69 se muestra un diagrama de barras con la única categoría de impacto ambiental obtenida.

EPS 2000	E. BASE (S0; C0)	E.1 (Smin; C0)	E.2 (Smax; C0)	E.3 (S0; Smin)	E.4 (S0; Cmax)	E.5 (Smin; Cmin)	E.6 (Smax; Cmax)	E.7 (Smax; Cmin)	E.8 (Smin; Cmax)
Salud Humana (Pt /Tn)	162,37	162,02	158,86	144,89	122,89	142,70	117,86	139,68	120,72
Biodiversidad (Pt /Tn)	-0,01	-0,01	0,01	-0,01	0,02	0,01	0,04	0,02	0,03
Capacidad de Producción de los Ecosistemas (Pt /Tn)	-3,93	-4,29	-7,66	-8,10	-18,45	-10,26	-23,84	-13,58	-20,59
Agotamiento delos Recursos Abióticos (Pt /Tn)	2,05	2,05	2,01	1,83	1,56	1,81	1,51	1,78	1,54
<b>Total (Pt)</b>	<b>160,5</b>	<b>159,8</b>	<b>153,2</b>	<b>138,6</b>	<b>106,0</b>	<b>134,3</b>	<b>95,6</b>	<b>127,9</b>	<b>101,7</b>

Tabla 34 Categorías de impacto del método opcional EPS 2000. Fuente: Propia.

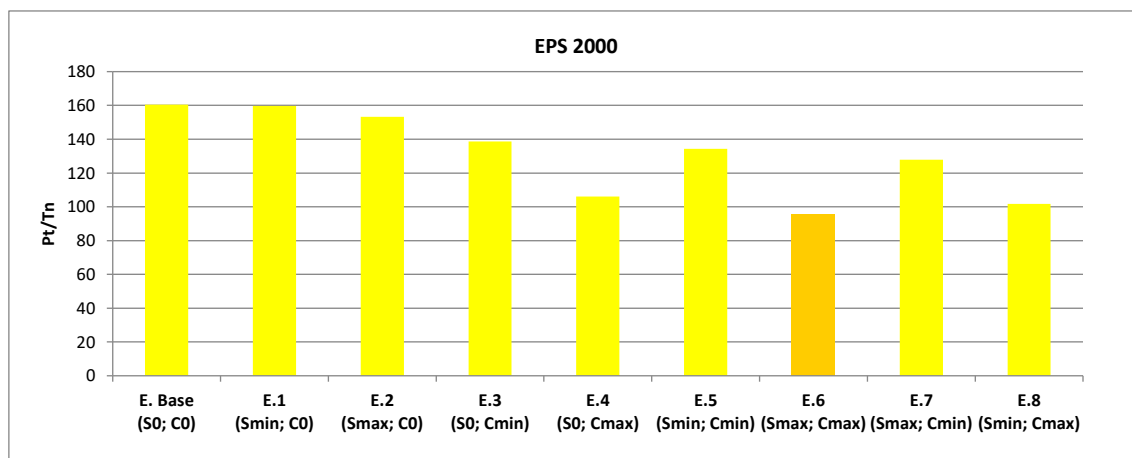


Figura 69. Único impacto ambiental calculado mediante el EPS 2000. Fuente: Propia

Tras el análisis de sensibilidad se observa como el mejor escenario se trata del número 6. Por lo tanto, los resultados obtenidos mediante indicadores opcionales según la ISO 14040-44 (2006) son consistentes con los obtenidos en el apartado anterior mediante los indicadores obligatorios.



## 8.4. ETAPA IV: INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

La conclusión más inmediata que se obtiene tras la Evaluación del Impacto del Ciclo de Vida de todos los escenarios alternativos propuestos al SGR de João Pessoa es que con las mejoras implementadas: la optimización de la recogida selectiva, la optimización de la Planta de Materiales Reciclables y la introducción al compostaje se obtienen mejores resultados en los impactos de Acidificación, Eutrofización, Calentamiento Global y la Oxidación Fotoquímica.

Con todas estas medidas se evidencian en una mayor cantidad de residuos reciclados, unas mejores tasas de reciclaje y por ende en una reducción de residuos dispuestos en los vertederos. Cada categoría de impacto ambiental está más influenciada por alguna o algunas etapas en concreto.

En las categorías de impacto en las que la etapa del reciclaje contribuye notablemente, como la Acidificación y la Eutrofización, las medidas introducidas contribuyen positivamente a los impactos ambientales, esto es debido a que se obtienen muy buenas tasas de reciclaje gracias a la optimización de la recogida selectiva y los procesos de la PRM.

Por otro lado, en las categorías de impacto ambiental en las que el vertedero tiene una gran contribución, como el Calentamiento Global y la Oxidación Fotoquímica, las mejoras propuestas reducen la cantidad de residuos depositados en él, por lo que los resultados ambientales son mejores. La consecuencia es la reducción de materia orgánica en el vertedero con estas medidas.

A pesar de que el **Escenario 6** no es el mejor en la categoría de impacto de Destrucción de la Capa de Ozono, en todas las otras categorías de impacto los resultados son excelentes, por lo que se le puede asignar la posición de **ESCENARIO OPTIMO**.

Dicho Escenario, incorpora la optimización de la recogida selectiva, la optimización de la Planta de Recuperación de Materiales y la introducción del compostaje con valores máximos.

## 9. BLOQUE IV: ANÁLISIS DEL ESCENARIO ÓPTIMO

Uno de los propósitos al realizar este trabajo era diseñar un escenario alternativo capaz de cumplir con las metas marcadas por la ley hasta el 2031-2034. Estos objetivos a largo plazo se distinguen en:

- ✓ Reducir Residuos Húmedos en el vertedero hasta un 50% para el 2034 (Ver Figura 27).
- ✓ Aumentar el ratio de materiales valorizables hasta conseguir un valor del 25% para el 2031 (Ver Figura 28).

A continuación, en los siguientes apartados se va a analizar el escenario óptimo propuesto (Escenario 6), para ver si se consiguen estos objetivos con las mejoras implementadas en él, tanto su Viabilidad Normativa como su Viabilidad Económica.

### 9.1. ANÁLISIS DEL CUMPLIMIENTO DE LA NORMATIVA

En el siguiente apartado se estudia la Viabilidad Normativa del Escenario 6, con la finalidad de comprobar si se cumplen las metas y los plazos establecidos para la reducción de RSD-secos y RSD—húmedos en los vertederos.

#### 9.1.1. METAS Y PLAZOS PARA LA REDUCCIÓN DE LA DISPOSICIÓN DE LOS RSD SECOS EN EL VERTEDERO

En la Figura 70 se muestra el porcentaje de Residuos Reciclables evitados en los vertederos junto con las metas y los plazos establecidos para esa reducción.

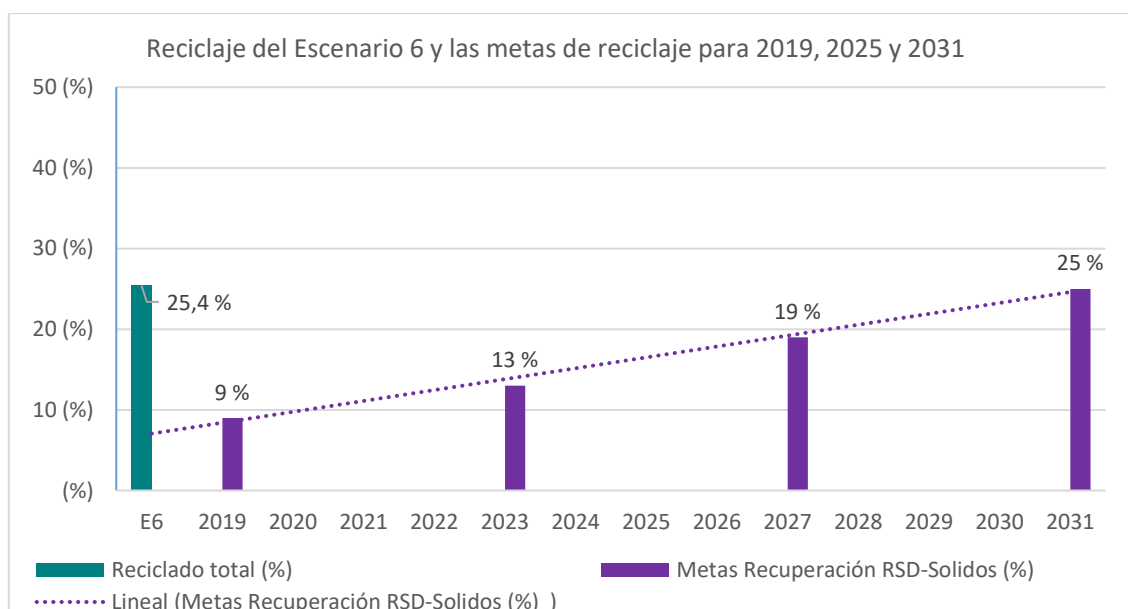


Figura 70. Comparativa entre el porcentaje de residuos secos recuperados en el Escenario 6 y las metas de reciclaje des de 2019 a 2031. Fuente: Propia

Con la optimización de la recogida selectiva, de la Planta de Recuperación de Materiales y con la introducción compostaje en el Escenario 6, se incrementa la cantidad de materiales reciclados

hasta 25,4 %, con este valor tan bueno se estaría por encima de las metas propuestas en el PMGIRS.

### 9.1.2. METAS Y PLAZOS PARA LA REDUCCIÓN DE LA DISPOSICIÓN DE LOS RSD HÚMEDOS EN EL VERTEDERO

En la Figura 71 se muestra el porcentaje de Residuos Domiciliares Húmedos evitados en los vertederos y por lo tanto compostados junto con las metas y los plazos establecidos para esa reducción.

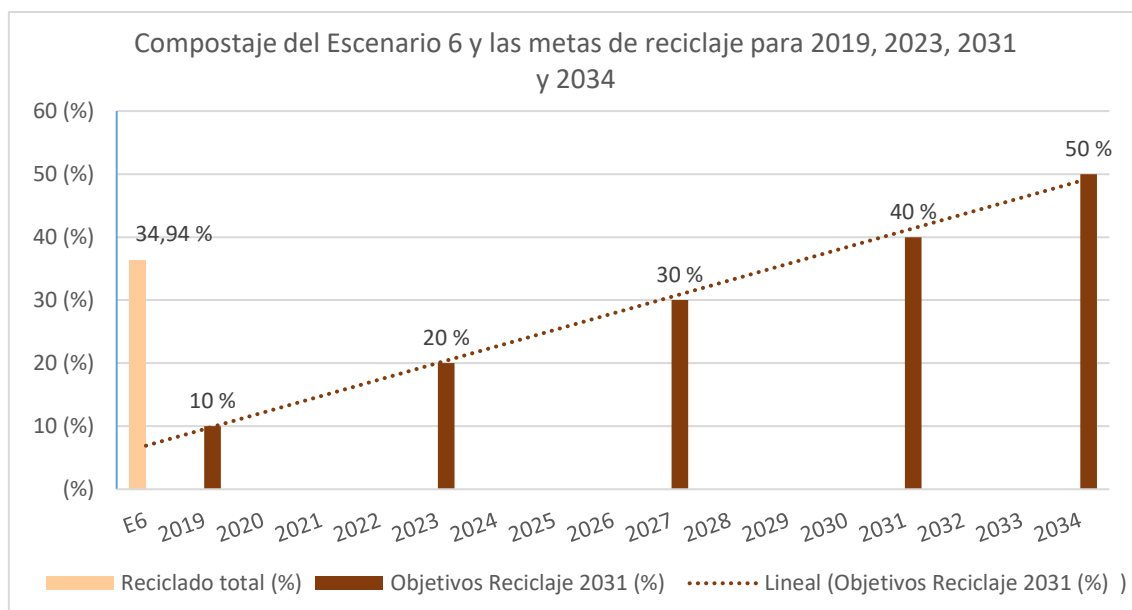


Figura 71. Comparativa entre el porcentaje de residuos húmedos recuperados en el Escenario 6 y las metas de reciclaje des de 2019 a 2031. Fuente: Propia

Con las medidas establecidas en el Escenario 6 se evita depositar en el vertedero un 34,94% de la materia orgánica producida en João Pessoa. Con este valor se estaría cumpliendo con las metas propuestas hasta el 2029. Lo deseable sería que este porcentaje fuera aumentando año tras año de forma paulatina hasta conseguir llegar al 50% en 2034.

Para cumplir con las metas establecidas, es necesario una mayor participación ciudadana. Cuanta más gente se implique en el programa, más residuos se recogerán de forma selectiva y la calidad de los residuos recogidos de forma convencional será más homogénea. De esta forma se facilitará el trabajo en la PRM, aumentando más aún su eficiencia con lo que se incrementará la recuperación de materia orgánica para realizar compost y una mayor recuperación de materiales valorizables.

## 9.2. ANÁLISIS DE LA ECO-EFICIENCIA

En este apartado se muestra el Presupuesto Operativo del Sistema de Gestión de Residuos del Escenario BASE y del Escenario Óptimo (Escenario 6), con la finalidad de comprar el impacto económico con el impacto ambiental.

### 9.2.1. ANÁLISIS AMBIENTAL

Como ya se ha visto en el apartado de evaluación del impacto ambiental (Ver Apartado 8), el escenario escogido como óptimo (Escenario 6) mejora los impactos ambientales que el escenario BASE.

Los datos que se utilizaran son los calculados con el Eco-Indicador 99, se resumen en la Tabla 35

Eco-Indicador 99	Escenario BASE (S0; C0)	Escenario 6 (Smax; Cmax)
Total (Pt /Tn)	9,034	0,705

Tabla 35. Impacto ambiental del Escenario Base y del Escenario 6 calculado con el Eco Indicador 99.  
Fuente: Propia.

### 9.2.2. ANÁLISIS ECONÓMICO

#### 9.2.2.1. Precios unitarios

A continuación, en la Tabla 36 se muestran todos los precios unitarios de todas los operarios, materias y energías que se utilizan en el SGR de João Pessoa, los datos son extraídos de la propia fuente de origen y se han convertido a la moneda europea, utilizando el tipo de cambio de Reales Brasileños a Euros del Banco Central Europeo para el 8 de Julio (1 Euro = 4,275 Brazilian Real).

Designación	Importe	Unidad
Salario Anual por operario	4.020,01	€/persona
Dietas Anuales por operario	216,14	€/persona
Gasto Anual EPI's por operar	26,11	€/persona
Coste Electricidad	0,20	€/KWh
Coste Diésel	0,85	€/L
Coste Agua	0,001	€/L
Coste alambre	2,20	€/Kg

Tabla 36. Cuadro de precios unitarios de los operarios, materias y energías. Fuente: Propia.

### 9.2.2.2. Costes operacionales por etapas del sistema de gestión

A continuación, de la Tabla 37 a la Tabla 43 se exponen los costes operacionales por etapas del Escenario BASE y del Escenario 6 del sistema de gestión al año.

#### COSTES OPERATIVOS RECOGIDA SELECTIVA

Designación	Unidades Escenario BASE	Unidades Escenario 6	Importe Escenario BASE	Importe Escenario 6
Salario Anual Operarios	3 personas	8 personas	12.060,0 €	32.160,1 €
Coste Diésel	37.234,8 L	376.523,76 L	31.529,8 €	318.834,2 €
			<b>43.589,8 €</b>	<b>350.994,3 €</b>

Tabla 37. Costes operativos de la recogida selectiva. Fuente: Propia.

#### COSTES OPERATIVOS RECOGIDA CONVENCIONAL

Designación	Unidades Escenario BASE	Unidades Escenario 6	Importe Escenario BASE	Importe Escenario 6
Salario Anual Operarios	33 personas	33 personas	133.127,6 €	133.127,6 €
Coste Diésel	106.258,6 L	100.025,3 L	89.978,1 €	84.699,8 €
			<b>223.105,7 €</b>	<b>217.827,4 €</b>

Tabla 38. Costes operativos de la recogida convencional. Fuente: Propia.

#### COSTES OPERATIVOS PLANTA DE MATERIALES RECICLADOS - NÚCLEOS

Designación	Unidades Escenario BASE	Unidades Escenario 6	Importe Escenario BASE	Importe Escenario 6
Salario Anual Operarios	68 personas	68 personas	273.361,0 €	273.361 €
Dietas Anuales Operarios	68 personas	68 personas	14.697,5 €	14.697,5 €
Gasto EPI's	68 personas	68 personas	1.775,2 €	1.775,2 €
Coste Electricidad	14.666,8 KWh	33.654 KWh	2.931,3 €	6.726,1 €
Coste Agua	1.693.456,7 L	3.885,752,25 L	1.997,9 €	4.584,4 €
Coste Alambre	1.390,8 kg	3.191,2 kg	3.059,7 €	7.020,6 €
			<b>297.822,6 €</b>	<b>308.164,7 €</b>

Tabla 39. Costes operativos de los Núcleos. Fuente: Propia.

**COSTES OPERATIVOS PLANTA DE RECUPERACIÓN DE MATERIALES - PRM**

<b>Designación</b>	<b>Unidades Escenario BASE</b>	<b>Unidades Escenario 6</b>	<b>Importe Escenario BASE</b>	<b>Importe Escenario 6</b>
Salario Anual Operarios	85 personas	85 personas	341.701,2 €	341.701,2 €
Dietas Anuales Operarios	85 personas	85 personas	18.371,9 €	18.371,9 €
Gasto EPI's	85 personas	85 personas	2.219,0 €	2.219,0 €
Coste Electricidad	11.803.712,5 kWh	21.913.711,9 kWh	2.359.085,8 €	4.379.666,8 €
Coste Agua	276.066.601,1 L	273.793.815,45 L	325.700,5 €	323.019,1 €
Coste Alambre	218.692,1 kg	216.891,65 kg	481.122,6 €	477.161,6 €
			<b>3.528.201,0 €</b>	<b>5.542.139,5 €</b>

Tabla 40. Costes operativos de la PRM. Fuente: Propia.

**COSTES OPERATIVOS COMPOSTAJE**

<b>Designación</b>	<b>Unidades Escenario BASE</b>	<b>Unidades Escenario 6</b>	<b>Importe Escenario BASE</b>	<b>Importe Escenario 6</b>
Salario Anual Operarios	0 personas	2 personas	0,0 €	8.040,0 €
Coste Diésel	0 L	37335,98 L	0,0 €	31.615,5 €
			<b>0,0 €</b>	<b>39.655,5 €</b>

Tabla 41. Costes operativos del compostaje. Fuente: Propia.

**COSTES OPERATIVOS TRANSPORTES INTERMEDIOS**

<b>Designación</b>	<b>Unidades Escenario BASE</b>	<b>Unidades Escenario 6</b>	<b>Importe Escenario BASE</b>	<b>Importe Escenario 6</b>
Salario Anual Operarios	5 personas	5 personas	20.100,1 €	20.100,1 €
Coste Diésel (Núcleos-Intermediarios)	376,4 L	863,7 L	318,7 €	731,3 €
Coste Diésel (PRM-Intermediarios)	1780,2 L	8.338,2 L	1.507,5 €	13.760,6 €
Coste Diésel (Interm.-Planta Reciclaje)	14552,2 L	50.642,9 L	12.322,6 €	42.883,6 €
			<b>34.248,8 €</b>	<b>70.775,6 €</b>

Tabla 42. Costes operativos de los transportes intermedios. Fuente: Propia.

**COSTES OPERATIVOS VERTEDERO**

<b>Designación</b>	<b>Unidades Escenario BASE</b>	<b>Unidades Escenario 6</b>	<b>Importe Escenario BASE</b>	<b>Importe Escenario 6</b>
Salario anual por operario	20 personas	20 personas	80.400,3 €	80.400,3 €
Coste Electricidad	10454,9 kWh	8109 kWh	2.089,5 €	1.620,7 €
Coste Diésel	203997,4 L	158223,7 L	172.741,6 €	133.981,2 €
			<b>255.231,4 €</b>	<b>216.002,2 €</b>

Tabla 43. Costes operativos de los Vertederos. Fuente: Propia

### 9.2.2.3. COSTE OPERACIONAL EN FUNCIÓN DE LAS TONELADAS GESTIONADAS

A continuación, en la Tabla 44 se muestra el coste operacional en cada una de las etapas del SGR en función de las toneladas de RSD gestionadas anualmente.

<b>Descripción de la Etapa</b>	<b>Importe Total</b>	<b>Importe Total</b>
Recogida Selectiva	0,17 €/Tn RSD	1,356 €/Tn RSD
Recogida Convencional	0,86 €/Tn RSD	0,841 €/Tn RSD
Unidad de Clasificación de la Recogida Selectiva - Núcleos	1,15 €/Tn RSD	1,190 €/Tn RSD
Planta de Recuperación de Materiales (PRM)	13,63 €/Tn RSD	21,405 €/Tn RSD
Planta de Compostaje	0 €/Tn RSD	0,153 €/Tn RSD
Transportes Intermedios: Núcleos - Intermediarios	0,027 €/Tn RSD	0,029 €/Tn RSD
Transportes Intermedios: PRM - Intermediarios	0,032 €/Tn RSD	0,053 €/Tn RSD
Transportes Intermedios: Intermediarios - Planta de Reciclaje	0,073 €/Tn RSD	0,192 €/Tn RSD
Vertedero	0,99 €/Tn RSD	0,834 €/Tn RSD
	<b>16,925 €/Tn RSD</b>	<b>26,053 €/Tn RSD</b>

Tabla 44. Costes operacionales del Escenario Base y del Escenario 6 en función de las toneladas de RSD gestionadas anualmente. Fuente: Propia.

### 9.2.3. DIAGRAMA DE ECO-EFICIENCIA

Con los valores de impacto ambiental calculados en el apartado de análisis de sensibilidad (Ver Apartado 8.3.4.) y los datos económicos del coste operativo calculado en el apartado anterior (Apartado 9.2.2) se ha realizado un diagrama de Eco-Eficiencia (Ver Figura 72). La metodología seguida para realizar este diagrama está basada en el análisis de Eco-Eficiencia (Ibáñez-Forés, 2013).

Los valores utilizados para realizar el diagrama se resumen en la Tabla 45.

	Escenario BASE (S0; C0)	Escenario 6 (Smax; Cmax)	Observaciones
Impacto Ambiental (Pt /Tn RSD)	9,034	0,705	Disminución del 92,2%
Impacto Económico (€/Tn RSD)	16,925	26,053	Aumento del 53,9%

Tabla 45. Impacto Ambiental e impacto económico para el Escenario BASE y el Escenario 6 y su variación porcentual.  
Fuente: Propia.

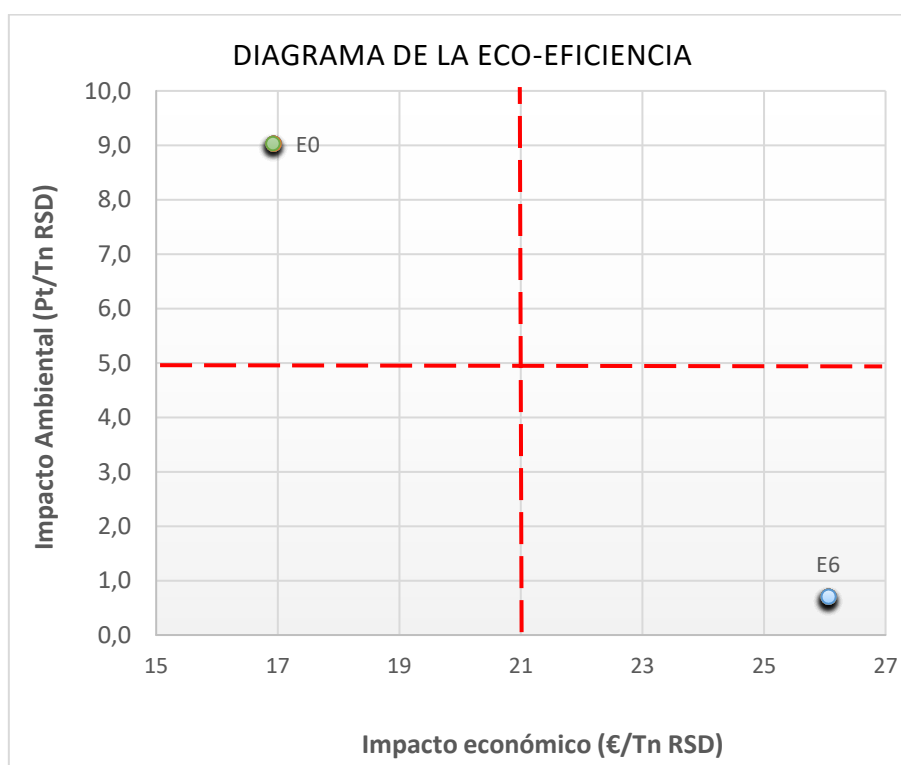


Figura 72. Diagrama de la Eco-Eficiencia. Fuente: Propia

Como se explica en la Tabla 45, la mejora del impacto ambiental está cuantificada en un **92,2%** y los costes operativos aumentan **un 54%** del Escenario Base al Escenario Óptimo. Por lo tanto se puede concluir que la mejora que se produce en términos ambientales es mucho mayor que en términos de coste. Se concluye en que los resultados son satisfactorios.



## 10. CONCLUSIÓN FINAL

En base a los resultados obtenidos, la primera conclusión que se puede hacer es que en general, con las medidas implantadas en los escenarios alternativos (optimizar la recogida selectiva, optimizar la Planta de Recuperación de Materiales e introducir el compostaje) del Sistema de Gestión de Residuos de João Pessoa se obtienen unos resultados mucho mejores que en el escenario actual (Escenario BASE). Concretamente en el Escenario 6 el cual está compuesto por las mejoras citadas en sus valores máximos de aplicación, los resultados son excelentes, tanto a nivel ambiental como con en el cumplimiento de la ley.

Si bien es cierto que el objetivo de reducción de residuos húmedos en el vertedero con la producción de compost, implantándose y manteniéndose invariable en ese valor (34,94 %), solamente estaría cubierta hasta 2029, por lo que ese recomienda que año tras año aumentare un 2,4% para poder llegar al objetivo marcado para 2034 (50%).

La meta de reducción de residuos secos en el vertedero para el 2031 se consigue mediante las mejoras propuestas para aumentar el reciclaje. Esto muestra que las propuestas son adecuadas para cubrir esta meta. Ahora bien habría que seguir mejorando para conseguir un SGR cada vez más eficiente y sostenible.

Con el Análisis del Ciclo de Vida ha sido posible identificar los impactos ambientales del Sistema de Gestión en Joao Pessoa, tanto para el escenario base como para los escenarios propuestos. Gracias a este análisis se ha confirmado que con la aplicación de las tres medidas de forma conjunta ha permitido una sinergia entre ellas y una consecuente obtención de los resultados magníficos tal y como muestra el Escenario 6, el cual supone una mejora ambiental del 92% (Eco-Indicador 99).

Por contra a todas estas mejoras ambientales, al proponer todas estas tres medidas ha provocado un coste añadido en el proceso operativo del SGR, este aumento del coste está cuantificado en un 54%, este valor es significativo, pero comparado con los beneficios ambientales producidos y con la necesidad de cumplir con la norma establecida en el PMGIRS, se trata de un valor económicamente aceptable.

En definitiva, se ha demostrado que las propuestas realizadas y analizadas comparativamente desde el punto de vista ambiental son técnicamente viables, puesto que se basan en la incorporación de tecnología ya utilizada en otras zonas de Brasil más desarrolladas; ambientalmente adecuadas, puesto que permiten reducir el impacto ambiental; permiten cumplir las metas normativas para el año 2031 y 2034 y además, la carga económica que supone como se ha comentado es económicamente aceptable, dadas todas las mejoras que se producen.

## 11. NORMAS Y REFERENCIAS

### 11.1. LEGISLACIÓN APLICABLE

*Lei 12305, 2010. Lei no 12.305 de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólido.*

*Guia para la elaboração dos Plaos de Gestão de Resíduos Sólidos (2011). Ministério do Meio Ambiente.*

*Plano Distrital De Gestão Integrada De Resíduos Sólidos (PDGRIS). Governo de Brasília, 2018. Março de 2018*

*Plano de Gerenciamento de Resíduos Sólidos – PGRS da Município de Florianópolis / SC. Companhia Melhoramentos da Capital – COMCAP, 2011. Fevereiro de 2011.*

*Plano Municipal de Coleta Seletiva. Prefeitura Municipal de Florianópolis, 2016. Agosto de 2016.*

*Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Goiânia-GO. Prefeitura de Goiânia, 2016. Fevereiro de 2016*

*Plano Municipal de Gestão integrada de Resíduos Sólidos–PMGIRS da cidade do João Pessoa, 2014. Diagnostico Agosto 2014.*

*Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. Volume 1 – Diagnóstico e Prognóstico Porto Alegre. Prefeitura Municipal de Porto Alegre, 2013. Agosto de 2013.*

*Relatorio de Atividades SLU. Janeiro a Setembro 2018. Serviço de Limpeza Urbana, 2018*

### 11.2. BIBLIOGRAFÍA Y FUENTES DE INFORMACIÓN

*Angelo, A. C. M., Saraiva, A. B., Clímaco, J. C. N., Infante, C. E., & Valle, R. (2017). Life Cycle Assessment and Multi-criteria Decision Analysis: Selection of a strategy for domestic food waste management in Rio de Janeiro. Journal of cleaner production, 143, 744-756.*

*Azevedo, B. D., Scavarda, L. F., & Caiado, R. G. G. (2019). Urban solid waste management in developing countries from the sustainable supply chain management perspective: A case study of Brazil's largest slum. Journal of Cleaner Production.*

*Calderoni, S. (1997). Os bilhões perdidos no lixo. Humanitas.*

*Chai, X., Tonjes, D. J., & Mahajan, D. (2016). Methane emissions as energy reservoir: Context, scope, causes and mitigation strategies. Progress in Energy and Combustion Science, 56, 33-70.*

*Coelho, L. M. G., & Lange, L. C. (2018). Applying life cycle assessment to support environmentally sustainable waste management strategies in Brazil. Resources, Conservation and Recycling, 128, 438-450.*

Costa, A. R. S., Ximenes, T. C. F., Ximenes, A. F., & Beltrame, L. T. C. (2016). O processo da compostagem e seu potencial na reciclagem de resíduos orgânicos| The process of composting and its potential in the recycling of organic waste. *Revista Geama*, 1(2), 246-260.

De Campos Domingos, D., & Boeira, S. L. (2015). Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos domiciliares: análise do atual cenário no município de Florianópolis. *Revista de Gestão Ambiental e Sustentabilidade: GeAS*, 4(3), 14-30.

ECOEMBES. (2010). Recomendaciones para el diseño de un servicio municipal de recogida puerta a puerta de papel y cartón comercial. Recuperado de [https://www.ecoembes.com/sites/default/files/recogida\\_puerta\\_a\\_puerta\\_carton\\_comercial.pdf](https://www.ecoembes.com/sites/default/files/recogida_puerta_a_puerta_carton_comercial.pdf)

Ecoinvent 3.5 (2018) <https://www.ecoinvent.org/database/ecoinvent-35/ecoinvent-35.html>

Ecoinvent Centre, 2007. Ecoinvent Database, Version 2. Swiss Centre for Life Cycle. Inventories, Switzerland.

Ecoinvent Centre, 2014. Ecoinvent Database, Version 3. Swiss Centre for Life Cycle. Inventories, Switzerland.

Gabi PE International, 2010. Gabi V4.3, Germany. <<http://www.gabi-software.com/>>

Ghesla, P., Gomes, L., Caetano, M., Miranda, L., & Dai-Prá, L. (2018). Municipal Solid Waste Management from the Experience of São Leopoldo/Brazil and Zurich/Switzerland. *Sustainability*, 10(10), 3716.

Gomes, L. P., Kohl, C. A., Souza, C. L. D. L., Rempel, N., Miranda, L. A. S., & Moraes, C. A. M. (2015). Avaliação ambiental de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos precedidos ou não por unidades de compostagem. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 20(3), 449-462.

Ibáñez-Forés, V., Bovea, M. D., Coutinho-Nóbrega, C., & de Medeiros, H. R. (2019). Assessing the social performance of municipal solid waste management systems in developing countries: Proposal of indicators and a case study. *Ecological Indicators*, 98, 164-178

Ibáñez-Forés, V., Coutinho-Nóbrega, C., Bovea, M. D., de Mello-Silva, C., & Lessa-Feitosa-Virgolino, J. (2018). Influence of implementing selective collection on municipal waste management systems in developing countries: A Brazilian case study. *Resources, Conservation and Recycling*, 134, 100-111.

Ibáñez-Forés, V., Bovea, M. D., Coutinho-Nóbrega, C., de Medeiros-García, H. R., & Barreto-Lins, R. (2018). Temporal evolution of the environmental performance of implementing selective collection in municipal waste management systems in developing countries: A Brazilian case study. *Waste Management*, 72, 65-77.

Ibáñez-Forés, V., Bovea, M. D., & Azapagic, A. (2013). Assessing the sustainability of Best Available Techniques (BAT): methodology and application in the ceramic tiles industry. *Journal of Cleaner Production*, 51, 162-176.

IPCC, 2013: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.

Kucbel, M., Raclavská, H., Růžicková, J., Švédová, B., Sassmanová, V., Drozdová, J. & Juchelková, D. (2019). Properties of composts from household food waste produced in automatic composters. *Journal of environmental management*, 236, 657-666.

Lima, P. D. M., Olivo, F., Paulo, P. L., Schalch, V., & Cimpan, C. (2019). Life Cycle Assessment of prospective MSW management based on integrated management planning in Campo Grande, Brazil. *Waste Management*, 90, 59-71.

Lemos da Silva, F. & Contreras, F. (2018). *Processo de funcionamento e análise da eficiência das usinas de triagem e tratamento de resíduos sólidos urbanos do distrito federal*.

Medeiros, H. R. (2016). Avaliação do ciclo de vida socioambiental do programa de coleta seletiva de resíduos sólidos domiciliares do município de João Pessoa/pb, Brasil. Estudo de caso: Núcleo do Bessa. (*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental –Mestrado*). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa

Márquez, L. (2011). *Residuos sólidos: un enfoque multidisciplinario*. Libros en Red, México DF.

Mehta, Yash D.; Shastri, Yogendra; Joseph, Babu. *Economic analysis and life cycle impact assessment of municipal solid waste (MSW) disposal: A case study of Mumbai, India*. *Waste Management & Research*, 2018, vol. 36, no 12, p. 1177-1189.

Melo, V. S. (2011). *Requisitos para a implantação de uma usina de triagem e compostagem no município de Telêmaco Borba-PR*.

Mouhoun-Chouaki, S., Derridj, A., Tazdaït, D., & Salah-Tazdaït, R. (2019). A Study of the Impact of Municipal Solid Waste on Some Soil Physicochemical Properties: The Case of the Landfill of Ain-El-Hammam Municipality, Algeria. *Applied and Environmental Soil Science*, 2019.

PRé Consultants, 2015. *SimaPro v.8*. PRé Consultants, B.V., Amersfoort, The Netherlands.

Reichert, G. A. (2013). *Apoio à tomada de decisão por meio da avaliação do ciclo de vida em sistemas de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos: o caso de Porto Alegre*. 301 f (Doctoral dissertation, Tese (Doutorado)—Universidade Federal Rio Grande do Sul. Instituto de Pesquisas Hidráulicas. Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental. Porto Alegre, Brasil).

Rigamonti, L., Grosso, M., & Sunseri, M. C. (2009). Influence of assumptions about selection and recycling efficiencies on the LCA of integrated waste management systems. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14(5), 411-419.

Rubio de Castro, L. (2018). *Diseño básico de una planta de reciclaje de residuos sólidos urbanos con una capacidad de 50.000 Tm/año*.

SimaPro 8.3 (2018) <https://www.pre-sustainability.com/>

Vega, M. V. S. (2016). *La capa de ozono*. *Biocenosis*, 21(1-2).

White, P., Dranke, M., & Hindle, P. (2012). *Integrated solid waste management: a lifecycle inventory*. Springer Science & Business Media.

Waldman, M. (2017). *Mais água, menos lixo: reciclar ou repensar?*. *Boletim Paulista de Geografia*, (79), 91-106.

Zaman, A. U. (2016). *A comprehensive study of the environmental and economic benefits of resource recovery from global waste management systems*. *Journal of cleaner production*.

Zulkepli, N. E., Muis, Z. A., Mahmood, N. A. N., Hashim, H., & Ho, W. S. (2017). *Cost benefit analysis of composting and anaerobic digestion in a community: A review*. *Chemical Engineering Transactions*, 56, 1777-1782.

### 11.3. BIBLIOGRAFÍA WEB

Agroambient.gva.es. (2015). *La acidificación del medio ambiente – Generalitat Valenciana*. [Online] Disponible en: <http://www.agroambient.gva.es/es/web/calidad-ambiental/la-acidificacion-del-medio-ambiente> [Acceso 11 Jun. 2019].

eacnur.org. (2018). *Efecto invernadero y calentamiento global: qué son y cómo se relacionan*. [Online] Recuperado de <https://eacnur.org/blog/efecto-invernadero-y-calentamiento-global-que-son-y-como-se-relacionan/> [Acceso 11 Jun. 2019].

Empresa de Pesquisa Energética. (2018). *MATRIZ ENERGÉTICA*. Recuperado 4 junio, 2019, de <http://epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>

getraambiental.com. (2014). *Especificação da reciclagem*. Recuperado de <http://www.getraambiental.com.br/especificacao.php> [Acceso 19 May. 2019].

Bezerra, J. (2018a, 18 octubre). *Capitais do Brasil*. Recuperado 2 julio, 2019, de <https://www.todamateria.com.br/capitais-do-brasi>

worldatlas.com. (2019). *Where is João Pessoa, Brazil?* Recuperado 5 julio, 2019, de <https://www.worldatlas.com/sa/br/pb/where-is-João-pessoa.html>

Ministerio para la transición ecológica. (2019). *Tratamientos biológicos*. Recuperado 29 junio, 2019, de <https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/prevencion-y-gestion-residuos/flujos/domesticos/gestion/sistema-tratamiento/Tratamientos-biologicos-biometanizacion.aspx>

### 11.4.PROGRAMAS UTILIZADOS

SimaPro 8.3 (2018)

AutoCad 2018 (2018)

# CAPÍTULO 2:

## ANEXOS

## Índice de los Anexos

<b>I. KILÓMETROS RECORRIDOS EN CAMIÓN CUBRIENDO EL 100% DE LA CIUDAD DE JOÃO PESSOA.....</b>	<b>130</b>
<b>II. CONSUMO DE DIÉSEL CONSUMIDO POR UN CAMIÓN REMOLQUE DE 4 TONELADA PARA LA RECOGIDA SELECTIVA.....</b>	<b>131</b>
<b>III. DIÉSEL CONSUMIDO POR UN CAMIÓN COMPACTADOR DE 16 TONELADAS PARA LA RECOGIDA CONVENCIONAL .....</b>	<b>132</b>
RECORRIDO REALIZADO POR LOS CAMIONES:.....	132
CONSUMO DE DIÉSEL.....	134
<b>IV. DIÉSEL CONSUMIDO EN LOS TRANSPORTES INTERMEDIOS .....</b>	<b>135</b>
<b>V. EFICIENCIA DE LAS PLANTAS DE RECUPERACIÓN .....</b>	<b>137</b>
<b>VI. LIXIVIADO GENERADO EN EL PROCESO DE COMPOSTAJE .....</b>	<b>138</b>
<b>VII. LIXIVIADO GENERADO EN EL VERTEDERO .....</b>	<b>139</b>
<b>VIII. EMISIONES AL AIRE POR LA DESCOMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS.....</b>	<b>140</b>

## I. KILÓMETROS RECORRIDOS EN CAMIÓN CUBRIENDO EL 100% DE LA CIUDAD DE JOÃO PESSOA

Lo kilómetros que debería recorrer un camión cubriendo el 100% de la población se han calculado considerando que para cada 1,75 km<sup>2</sup> de superficie de la ciudad, un camión recorre 36 km (Medeiros, 2016). Conociendo el área de cada uno de sus barrios, se ha podido estimar esta distancia. A continuación, en la Tabla 53 se muestran los kilómetros totales resultantes.

$$Ruta = \frac{Superficie \cdot 36}{1,75}$$

*Ecuación 2. Ecuación para calcular los kilómetros recorridos por el camión de recogida de residuos en función del área a recoger. Fuente: Propia.*

Ruta (km):                      Kilómetros recorridos por el camión para la recogida en toda la ciudad.  
Fuente: Propia.

Superficie (m<sup>2</sup>):            Superficie total de los barrios de João Pessoa. Fuente: Propia.

Recogida y transporte inicial	Superficie (km <sup>2</sup> )	Ruta (km)
Barrio dos Estados	8,39	172,59
Barrio Caic	4,52	92,98
Barrio Cabo Branco	6,9	141,94
Barrio Bessa	7,32	150,58
Barrio Mangabeira	11	226,29
<b>Total João Pessoa</b>		<b>784,389 km</b>

*Tabla 53. Kilómetros recorridos en camión cubriendo la ciudad de João Pessoa al completo. Fuente: Propia*



## II. CONSUMO DE DIÉSEL CONSUMIDO POR UN CAMIÓN REMOLQUE DE 4 TONELADA PARA LA RECOGIDA SELECTIVA

El consumo del camión utilizado para la recogida selectiva se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Consumo} \left( \frac{l}{Tn} \right) = \frac{\text{Ruta} \left( \frac{km}{dia} \right) \cdot \text{Frecuencia} \left( \frac{días}{mes} \right) \cdot 12 \left( \frac{meses}{año} \right)}{\text{Cantidad recogida} \left( \frac{Tn}{año} \right)} \cdot \text{Consumo camión} \left( \frac{l}{km} \right)$$

*Ecuación 3. Ecuación para calcular el consumo del camión de recogida selectiva en función de las toneladas recogidas.*

*Fuente: Propia.*

Consumo (l/Tn):	Consumo de diésel del camión remolque de 4 Tn capacidad por cada tonelada recolectada.
Ruta (km/día):	Kilómetros recorridos por el camión que realiza la recogida selectiva al día. Fuente: Propia.
Frecuencia (días/mes):	Días que el camión realiza la ruta al mes. Fuente: Propia.
Cantidad recogida (Tn/año):	Cantidad de residuos recogidos de forma selectiva en un año. Fuente: Propia.
Consumo del camión (l/Km):	Consumo de diésel del camión remolque de 4 Tn capacidad por cada kilómetro recorrido. Fuente: (EMLUR, 2017)

A continuación se muestra el consumo del camión para cada uno de los escenarios establecidos:

Recogida y transporte inicial	Ruta (km/día)	Frecuencia Recogida (días/mes)	Cantidad recogida (Tn/año)	Consumo camión (l/km)	Consumo por tonelada (l/Tn)
Escenario BASE, 3 y 4	135,83	8	1.636,18	5,00	39,85 l/Tn
Escenario 1, 5 y 7	547,84	8	1.877,177	5,00	140,08 l/Tn
Escenario 2, 6 y 8	784,39	8	3.754,36	5,00	100,28 l/Tn

*Tabla 54. Consumo de diésel de los camiones de recogida selectiva para todos los escenarios. Fuente Propia.*

### III. DIÉSEL CONSUMIDO POR UN CAMIÓN COMPACTADOR DE 16 TONELADAS PARA LA RECOGIDA CONVENCIONAL

Para calcular el diésel consumido por el camión compactador de 16 Tn de capacidad en la recogida convencional, primero que todo es necesario conocer los kilómetros recorridos durante la recogida.

#### RECORRIDO REALIZADO POR LOS CAMIONES:

Para conocer el recorrido total realizado por los camiones en la recogida convencional es necesario calcular previamente el número de viajes que debe realizar el camión desde los barrios de João Pessoa hasta la PRM cuando el camión se encuentra al límite de su capacidad.

$$N^{\circ} \text{ de viajes a la PRM} = \frac{\text{Cantidad recogida } \left(\frac{Tn}{\text{año}}\right)}{365 \left(\frac{\text{días}}{\text{año}}\right) \cdot \text{Capacidad Camión } \left(\frac{Tn}{\text{Viaje}}\right)}$$

*Ecuación 4. Ecuación para calcular el número de viajes que debe realizar el camión de recogida convencional a la PRM. Fuente: Propia.*

Nº de viajes:	Número de viajes que realiza a la PRM desde los barrios de João Pessoa. Fuente: Propia.
Cantidad recogida (Tn/año):	Cantidad de residuos recogidos de forma convencional en un año. Fuente: Propia.
Capacidad Camión (Tn/viaje):	Cantidad de toneladas que caben en el camión.

El cálculo del recorrido total se realiza mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Recorrido Total } \left(\frac{Km}{\text{día}}\right) = \text{Ruta } \left(\frac{km}{\text{día}}\right) + N^{\circ} \text{ Viajes} \cdot \text{Distancia PRM } \left(\frac{km}{\text{viaje}}\right) \cdot 2 \text{ (ida y vuelta)}$$

*Ecuación 5. Ecuación para el cálculo del recorrido que realizan los camiones durante una jornada laboral.*

Recorrido Total (km/día):	Kilómetros totales recorridos por el camión que realiza la recolección convencional al día, incluyendo los viajes a la PRM. Fuente: Propia.
Ruta (km/día):	Kilómetros recorridos por el camión que realiza la recolección convencional al día. Fuente: Propia.
Nº de viajes <sup>1</sup> :	Número de viajes que realiza a la PRM desde los barrios de João Pessoa. Fuente: Propia.
Distancia PRM (km/viaje):	Distancia media desde los barrios de João Pessoa hasta la PRM. Fuente: Propia.

A continuación, se muestran los resultados de los cálculos para cada uno de los escenarios:

<sup>1</sup> Calculado mediante la Ecuación 4

**ESCENARIO BASE Y ESCENARIOS 3 Y 4**

Recogida y transporte inicial	Cantidad recolectada (Tn/año)	Ruta recolección (km/día)	Capacidad Camión (Tn)	Viajes a la PRM	Distancia hasta la PRM (Km)	Recorrido total (km/día)
Barrio dos Estados	10.207,446	172,594	16	2	24	268,59
Barrio Caic	5.499,124	92,983	16	1	24,8	142,58
Barrio Cabo Branco	8.394,681	141,943	16	2	24	237,94
Barrio Bessa	8.905,662	150,583	16	2	29,7	269,38
Barrio Mangabeira	13.382,825	226,286	16	3	24,8	375,09
<b>Total João Pessoa</b>						<b>1.293,59</b>

Tabla 55. Calculo del recorrido total de los camiones en el Escenario BASE, 3 y 4. Fuente: Propia

**ESCENARIOS 1, 5 Y 7**

Recogida y transporte inicial	Cantidad recolectada (Tn/año)	Ruta recolección (km/día)	Capacidad Camión (Tn)	Viajes a la PRM	Distancia hasta la PRM (Km)	Recorrido total (km/día)
Barrio dos Estados	10.197,885	172,59	16	2	24	268,59
Barrio Caic	5.493,974	92,98	16	1	24,8	142,58
Barrio Cabo Branco	8.386,818	141,94	16	2	24	237,94
Barrio Bessa	8.897,320	150,58	16	2	29,7	269,38
Barrio Mangabeira	13.370,290	226,29	16	3	24,8	375,09
<b>Total João Pessoa</b>						<b>1.293,59</b>

Tabla 56. Calculo del recorrido total de los camiones en el Escenario 1, 5 y 7. Fuente: Propia

**ESCENARIOS 2, 6 Y 8**

Recogida y transporte inicial	Cantidad recolectada (Tn/año)	Ruta recolección (km/día)	Capacidad Camión (Tn)	Viajes a la PRM	Distancia hasta la PRM (Km)	Recorrido total (km/día)
Barrio dos Estados	10.123,410	172,59	16	2	24	268,59
Barrio Caic	5.453,851	92,98	16	1	24,8	142,58
Barrio Cabo Branco	8.325,570	141,94	16	2	24	237,94
Barrio Bessa	8.832,344	150,58	16	2	29,7	269,38
Barrio Mangabeira	13.272,647	226,29	16	3	24,8	375,09
<b>Total João Pessoa</b>						<b>1.293,59</b>

Tabla 57. Calculo del recorrido total de los camiones en el Escenario 2, 6 y 8. Fuente: Propia

## CONSUMO DE DIÉSEL

Finalmente, el diésel consumido por el camión compactador de 16 Tn de capacidad en la recogida convencional, se calcula con la siguiente ecuación:

$$\text{Consumo} \left( \frac{l}{Tn} \right) = \frac{\text{Recorrido} \left( \frac{km}{día} \right) \cdot \text{Frecuencia} \left( \frac{días}{mes} \right) \cdot 12 \left( \frac{meses}{año} \right)}{\text{Cantidad recolectada} \left( \frac{Tn}{año} \right)} \cdot \text{Consumo camión} \left( \frac{l}{km} \right)$$

*Ecuación 6. Ecuación para calcular el consumo del camión de recogida selectiva en función de las toneladas recogidas.  
Fuente: Propia.*

Consumo (l/Tn):	Consumo de diésel del camión compactador de 16 Tn capacidad por cada tonelada recolectada.
Ruta (km/día):	Kilómetros recorridos por el camión que realiza la recogida convencional al día. Fuente: Propia.
Frecuencia (días/mes):	Días que el camión realiza la ruta al mes. Fuente: Propia.
Cantidad recogida (Tn/año):	Cantidad de residuos recogidos de forma convencional en un año. Fuente: Propia.
Consumo del camión (l/Km):	Consumo de diésel del camión compactador de 16Tn de capacidad por cada kilómetro recorrido. Fuente: (EMLUR, 2017)

A continuación se muestran los resultados de los cálculos para cada uno de los escenarios propuestos.

Recogida y transporte inicial	Recorrido total (km/día)	Frecuencia Recogida (días/mes)	Cantidad recogida (Tn/año)	Consumo camión (l/km)	Consumo por tonelada (l/Tn)
Escenario BASE, 3 y 4	1.293,59	30	257.284,81	0,33	0,603 l/Tn
Escenario 1 , 5 y 7	1.293,59	30	257.043,82	0,33	0,604 l/Tn
Escenario 2, 6 y 8	1.293,59	30	255.166,65	0,33	0,392 l/Tn

*Tabla 58. Consumo de diésel por tonelada recogida convencionalmente por los vehículos de la recogida convencional.  
Fuente: Propia.*

## IV. DIÉSEL CONSUMIDO EN LOS TRANSPORTES INTERMEDIOS

El diésel que consumen los camiones que transportan desde los núcleos a los intermediarios, desde la PRM a los intermediarios y desde los intermediarios a la planta de reciclaje se calcula con la Ecuación 7.

En todos estos transportes se utiliza un camión de 11 Toneladas de capacidad. Y el consumo del diésel viene expresado en litros por tonelada de cada material transportado.

$$\text{Consumo } (l/Tn) = \frac{\text{Recorrido}(km) \cdot \text{Consumo Carg.} \left(\frac{l}{km}\right) + \text{Recorrido}(km) \cdot \text{Consumo Vac.} \left(\frac{l}{km}\right)}{\text{Capacidad camión}(Tn)}$$

*Ecuación 7. Ecuación para el cálculo del consumo de los transportes intermedios*

Consumo (l/Tn):	Consumo de diésel del camión por cada tonelada transportada de cada material.
Recorrido (km):	Distancia media. Fuente: Propia.
Consumo Carg. <sup>2</sup> (l/Tn):	Consumo de diésel en función de los kilómetros recorridos, cuando los camiones están cargados. Fuente: (EMLUR, 2016).
Consumo Vac. <sup>3</sup> (l/Tn):	Consumo de diésel en función de los kilómetros recorridos, cuando los camiones están vacíos, Fuente: (EMLUR, 2016).
Capacidad camión (Tn):	Cantidad de residuos que los camiones son capaces de transportar en unidad de masa. Fuente: Propia.

A continuación se muestran los resultados del cálculo:

Transporte		Recorrido medio (km)	Consumo camión cargado (l/km)	Consumo camión vacío (l/km)	Capacidad camión (Tn)	Consumo por tonelada (l/Tn)
Núcleos-Intermediarios	Papel	3,66	0,244	0,22	11	0,155
	Plástico	3,96	0,244	0,22	11	0,168
	Metal	10,34	0,244	0,22	11	0,438
	Vidrio	7,26	0,244	0,22	11	0,308
	Caucho	6,22	0,244	0,22	11	0,264
PRM-Intermediarios	Papel	18,1	0,244	0,22	11	0,767
	Plástico	18,5	0,244	0,22	11	0,784
	Metal	18,8	0,244	0,22	11	0,670
	Vidrio	19,7	0,244	0,22	11	0,835
	Caucho	25,6	0,244	0,22	11	1,085

<sup>2</sup> Transporte del origen al destino: de los núcleos a los intermediarios, de la PRM a los intermediarios y de los intermediarios a la planta de reciclaje.

<sup>3</sup> Transporte de regreso, del destino al origen: de los intermediarios a los Núcleos, de los intermediarios a la PRM y de la planta de reciclaje a los intermediarios.

Intermediarios -Planta de Reciclaje	Papel	179,0	0,204	0,182	11	6,280
	Plástico	15,8	0,204	0,182	11	0,554
	Metal	122,0	0,204	0,182	11	4,280
	Vidrio	121,0	0,204	0,182	11	4,245
	Caucho	6,8	0,204	0,182	11	0,239

Tabla 59. Consumo de diésel por tonelada de cada material transportado en los transportes intermedios. Fuente: Propia.

## V. EFICIENCIA DE LAS PLANTAS DE RECUPERACIÓN

En las plantas de reciclaje se tiene que tener en cuenta que no todo el material que entran en cada una de las plantas se recupera. Un porcentaje del material que llega a la planta es desechado, ya que no cumple con la calidad o con los estándares establecidos para convertirlos otra vez en materia prima. Además, hay un ratio de recuperación para cada una de las plantas, es decir, una vez seleccionado todo el material susceptible de valoración, no todo se recupera. Utilizando la Ecuación 8 se ha calculado la eficiencia de recuperación final de cada una de las plantas de reciclaje que se muestra en la Tabla 60.

$$\text{Eficiencia Recuperación (\%)} = (1 - \text{Porcentaje Desechado (tpu)}) \cdot \text{Ratio Recuperación (tpu)}$$

*Ecuación 8. Ecuación para el cálculo de la eficiencia de recuperación en cada una de las Plantas de Reciclaje. Fuente: Propia.*

	Porcentaje de material desechado (%)	Ratio de recuperación (tpu)	Eficiencia Recuperación (%)
Papel	2.5	1:0,833	0,812
Plástico	20	1:0,81	0,648
Metal	10	1:1	0,900
Vidrio	10	1:0,8	0,720

*Tabla 60. Eficiencia de recuperación para cada una de las Plantas de Reciclaje. Fuente: (Rigamonti et al., 2009).*

## VI. LIXIVIADO GENERADO EN EL PROCESO DE COMPOSTAJE

En la Tabla 61 se muestra la composición de lixiviado, en gramos, en función de los m<sup>3</sup> de cada residuo compostado.

Materia Orgánica	Composición del lixiviado (g/m <sup>3</sup> )
DBO	1.900
CDO	3.800
Solidos suspendidos	100
Componentes orgánicos	0,39
AOX	0,86
Clorado	0,18
Dioxinas	$1,6 \cdot 10^{-7}$
Fenol	0,1
Amonio	10
Metales	1,37
Arsénico	0,007
Cadmio	0,001
Cromo	0,05
Cobre	0,044
Hierro	1
Plomo	0,12
Mercurio	$1,9 \cdot 10^{-5}$
Níquel	0,12
Zinc	0,3
Cloruro	95
Fluoruro	0,14

Tabla 61. Composición del lixiviado de la materia orgánica generado en el compostaje.  
Fuente: (White et al., 2012)



## VII. LIXIVIADO GENERADO EN EL VERTEDERO

En la Tabla 62 se muestra la composición de lixiviado, en gramos, en función de los m<sup>3</sup> de cada residuo descompuesto en el vertedero.

Composición del lixiviado (g/m <sup>3</sup> )	Materia Orgánica	Papel	Plástico	Metal	Vidrio	Resto
DBO	3.167	3.167	0	0	0	0
CDO	6.000	6.000	0	0	0	0
Solidos suspendidos	100	100	100	100	100	100
Componentes orgánicos	2	2	2	2	2	2
AOX	2	2	2	2	2	2
Clorado	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03	1,03
Dioxinas	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$
Fenol	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38	0,38
Amonio	210	210	210	210	210	210
Metales	96,1	96,1	96,1	96,1	96,1	96,1
Arsénico	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014
Cadmio	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014	0,014
Cromo	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
Cobre	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054	0,054
Hierro	95	95	95	95	95	95
Plomo	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063	0,063
Mercurio	0,0006	0,0006	0,0006	0	0	0
Níquel	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17	0,17
Zinc	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
Cloruro	590	590	590	590	590	590
Fluoruro	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39

Tabla 62. Composición del lixiviado por la descomposición de la materia orgánica, papel, plástico, metal vidrio y resto.  
Fuente: (White et al., 2012)

## VIII. EMISIONES AL AIRE POR LA DESCOMPOSICIÓN DE LOS RESIDUOS

En la Tabla 63 se muestran la cantidad de emisiones al aire generadas, en miligramos, producidas por la descomposición de los residuos en función de los m<sup>3</sup> descompuestos.

Emisiones al aire	Gas del vertedero (mg/m <sup>3</sup> )
CO	12,5
CO <sub>2</sub>	883.930
CH <sub>4</sub>	392.860
HCl	65
HF	13
H <sub>2</sub> S	200
HC	2.000
Cadmio	$5,6 \cdot 10^{-3}$
Cromo	$6,6 \cdot 10^{-4}$
Plomo	$5,1 \cdot 10^{-3}$
Mercurio	$4,1 \cdot 10^{-5}$
Zinc	$7,5 \cdot 10^{-2}$

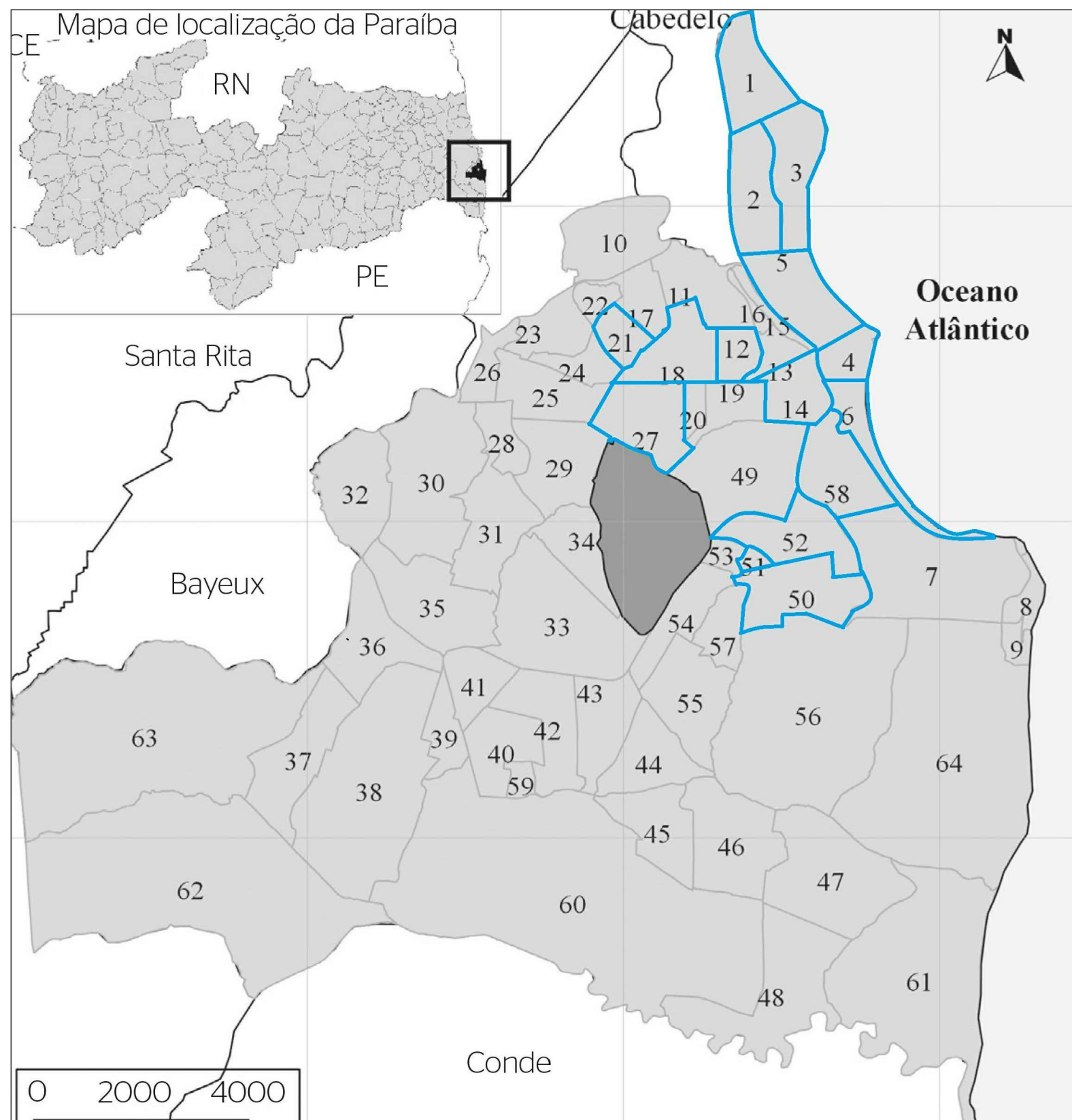
Tabla 63. Emisiones al aire del gas del vertedero por la descomposición de los residuos.  
Fuente (White et al., 2012)

# CAPÍTULO 3:

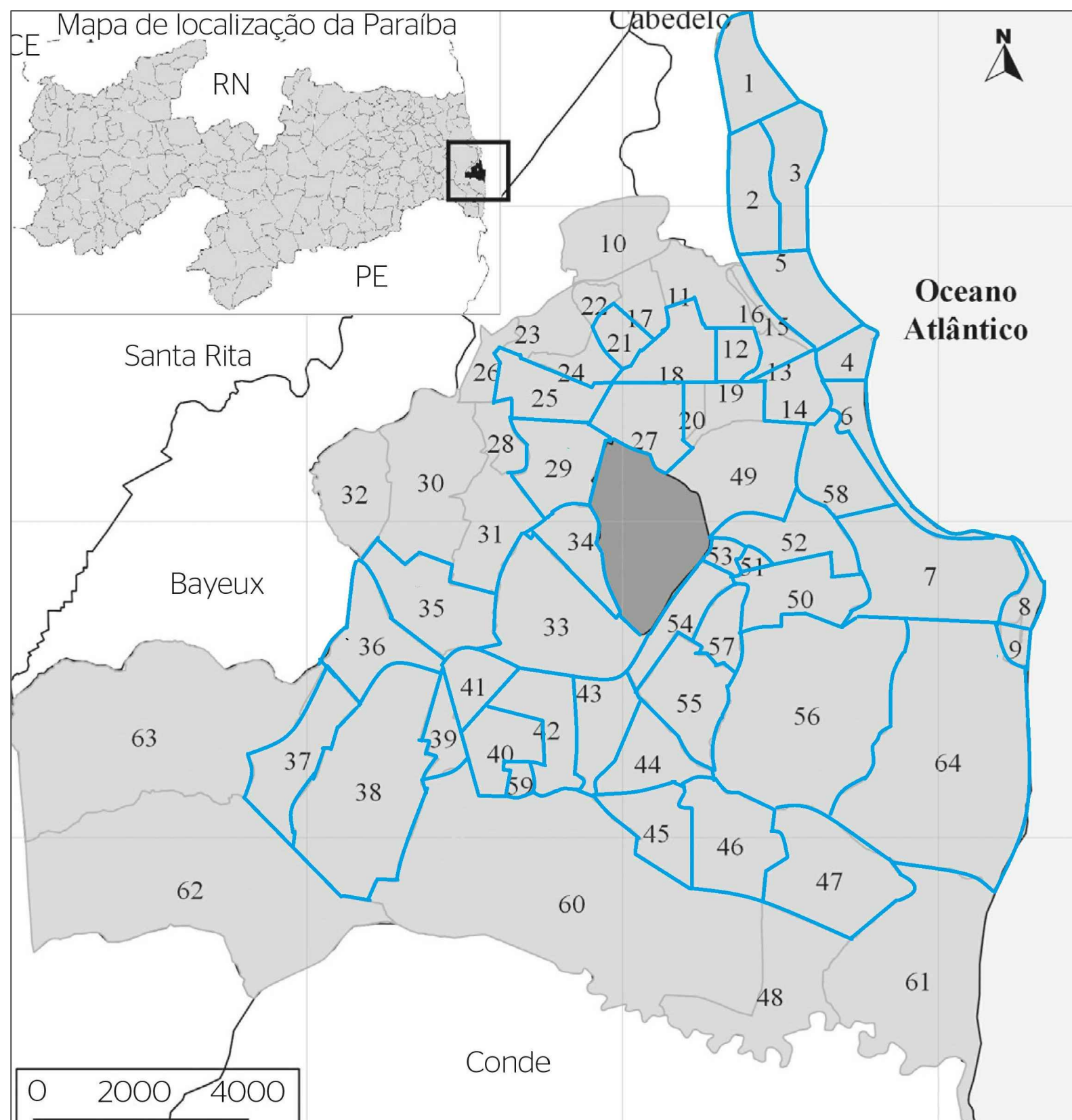
## PLANOS

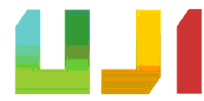
## Índice del Planos

<b>PLANO 1.....</b>	<b>147</b>
<b>PLANO 2.....</b>	<b>149</b>
<b>PLANO 3.....</b>	<b>151</b>



TÍTULO EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL Y PROPUESTA DE MEJORAS DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES EN JOAO PESSOA (BRASIL)		PLANO Nº <b>1</b>
PROPIETARIO	MARTA GUINOT MENEU	
DEPARTAMENTO	INGENIERÍA MECÁNICA Y CONSTRUCCIÓN	
ESCALA 1:100.000	PLANO PORCENTAJE DE APLICACIÓN DE LA RECOGIDA SELECTIVA EN EL ESCENARIO BASE (E0)	
FECHA JULIO 2019		



TÍTULO EVALUACIÓN DEL IMPACTO AMBIENTAL Y PROPUESTA DE MEJORAS DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE RESIDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES EN JOAO PESSOA (BRASIL)		PLANO Nº <b>2</b>
PROPIETARIO	MARTA GUINOT MENEU	
DEPARTAMENTO	INGENIERÍA MECÁNICA Y CONSTRUCCIÓN	
ESCALA 1:100.000	PLANO PORCENTAJE DE APLICACIÓN DE LA RECOGIDA SELECTIVA OPTIMIZANDO LA RECOGIDA AL NIVEL MÍNIMO (Smin)	
FECHA JULIO 2019		



# CAPÍTULO 4:

# PRESUPUESTO



## Índice del Presupuesto

<b>1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>154</b>
<b>2. COSTES UNITARIOS .....</b>	<b>154</b>
<b>3. INVERSIÓN PARA LA MEJORA I: OPTIMIZACIÓN DE LA RECOGIDA SELECTIVA .....</b>	<b>154</b>
<b>4. INVERSIÓN PARA LA MEJORA II: OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA DE RECUPERACIÓN DE MATERIALES.....</b>	<b>155</b>
<b>5. INVERSIÓN PARA LA MEJORA III: INTRODUCCIÓN DEL COMPOSTAJE .....</b>	<b>155</b>
<b>6. INVERSIÓN TOTAL .....</b>	<b>155</b>
<b>7. PRESUPUESTO DE LA EJECUCIÓN DEL TRABAJO .....</b>	<b>156</b>

## 1. INTRODUCCIÓN

En el siguiente capítulo está dedicado a aportar los datos económicos del proyecto que se ha planteado. Se ha dividido el capítulo en tres partes, una parte está dedicada a los costes operativos del Sistema de Gestión de Residuos en Joao Pessoa, se han calculado tanto los del escenario BASE como los del Escenario 6.

La segunda parte se trata de una estimación de la inversión que supondría la introducción de las mejoras tres mejoras para el Escenario óptimo (Escenario 6). Y por último, en el tercer apartado se calcula el coste que ha supuesto realizar un proyecto de estas dimensiones.

## 2. COSTES UNITARIOS

En este apartado se ha realizado una estimación de la inversión necesaria para poner en marcha el Escenario 6. Esta inversión se divide en 3 apartados, en cada uno se desglosa el presupuesto de cada una de las mejoras.

A continuación, en la Tabla 63 se muestra el cuadro de precios para este presupuesto:

Designación	Importe	Unidad	Observaciones
Camión remolque	45.611,90	€/Ud.	Capacidad: 30 m <sup>3</sup> = 4T
Alimentador	133.749,44	€/Ud.	Capacidad: 30 Tn/h
Trommel Abre - Bolsas	111.457,87	€/Ud.	Capacidad: 45 Tn/h
Electroimán	31.208,20	€/Ud.	Capacidad: 2 Tn/h
Bidón para el reciclaje	9,36	€/Ud.	
Mini cargadora	12.630,99	€/Ud.	
Termómetro digital infrarrojo	53,80	€/Ud.	

Tabla 63. Cuadro de Precios para el presupuesto de las instalaciones.

## 3. INVERSIÓN PARA LA MEJORA I: OPTIMIZACIÓN DE LA RECOGIDA SELECTIVA

En la Tabla 64 se muestran los costes de la inversión para la optimización de la recogida selectiva. Para que esta mejora sea efectiva es necesario ampliar la flota en 16 camiones.

Designación	Unidades	Precio Unitario	Importe
Camión remolque	5	45.611,90 €	228.059,51 €
			<b>228.059,51 €</b>

Tabla 64. Costes Inversión para la optimización de la recogida selectiva.

## 4. INVERSIÓN PARA LA MEJORA II: OPTIMIZACIÓN DE LA PLANTA DE RECUPERACIÓN DE MATERIALES

En la Tabla 65 se exponen los costes de inversión que suponen los nuevos equipos a instalar en la Planta de Recuperación de Materiales para mejorar su eficiencia

Designación	Unidades	Precio Unitario	Importe
Alimentador	1	133.749,44 €	133.749,44 €
Trommel	1	111.457,87 €	111.457,87 €
Electroimán	2	31.208,20 €	62.416,41 €
Bidón para el reciclaje	10	9,36 €	93,56 €
			<b>307.717,28 €</b>

Tabla 65. Costes Inversión para la optimización de la PRM

## 5. INVERSIÓN PARA LA MEJORA III: INTRODUCCIÓN DEL COMPOSTAJE

En la Tabla 66 se muestran los costes de los equipos necesarios para la introducción del compostaje.

Designación	Unidades	Precio Unitario	Importe
Minicargadora	1	12.630,99 €	12.630,99 €
Termómetro digital infrarrojo	1	53,80 €	53,80 €
			<b>12.684,79 €</b>

Tabla 66. Costes Inversión para la introducción del compostaje.

## 6. INVERSIÓN TOTAL

Para finalizar con este apartado, se realiza la suma de los costes de las tres mejoras, obteniendo finalmente la estimación de la Inversión Total, se muestra en la Tabla 67.

Designación	Inversión Total
Mejora Recogida Selectiva	228.059,51 €
Mejora eficiencia PRM	307.717 €
Introducción al compostaje	12.685 €
<b>Inversión Total</b>	<b>548.462 €</b>

Tabla 67. Costes de la Inversión Total

## 7. PRESUPUESTO DE LA EJECUCIÓN DEL TRABAJO

En este apartado se cuantifica monetariamente la ejecución del trabajo en cuestión. Para ello, en la Tabla 68 se muestran los costes unitarios de todos los gastos.

Descripción	Importe	Unidad	Observaciones
Personal	300	€/persona·mes	3 meses de contrato
Precio del Ordenador	800	€	5 años de vida útil
Licencia Software SimaPro	2700	€	16,6 % de su Uso
Contrato de mantenimiento del Software SimaPro	750	€/año	6 meses de uso

*Tabla 68. Cuadro de Precios para el presupuesto de la ejecución del trabajo.*

A continuación, en la Tabla 69 se muestra el presupuesto de Ejecución Final del Trabajo.

Designación	Importe
Personal	<b>900 €</b>
Precio del Ordenador	<b>80 €</b>
Licencia Software SimaPro	<b>450 €</b>
Contrato de mantenimiento del Software SimaPro	<b>375 €</b>
<b>TOTAL</b>	<b>1805 €</b>

*Tabla 69. Presupuesto de Ejecución Final del Trabajo.*